

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh rotační pece a dohořivací komory pro spalovnu nebezpečných
odpadů

Proposal of Rotary Kiln for Hazardous Waste Incineration Plant

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Student: Bc. Jaromír Bušovský

2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jaromír Bušovský**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh rotační pece a dohořivací komory pro spalovnu nebezpečných odpadů**
Proposal of Rotary Kiln for Hazardous waste Incineration Plant

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh koncepce rotační pece a dohořivací komory pro spalovnu nebezpečných odpadů na pevné a kapalné paliva obsahující nebezpečné látky typu PCDD a PCDF. Spalovna se skládá ze spalovací komory osazené stabilizačním hořákem na zemní plyn, sekundární dohořivací komory, výměníku tepla spaliny & voda a dvoustupňovým čištěním spalin na bázi suché sorpce a mokré vypírky na bázi NaOH. Proveďte základní tepelné a aerodynamické výpočty. Jmenovitý výkon spalovny: 1000 kg/h (pevné odpady 900 kg/h, kapalné odpady 100 kg/h), teplota spalin z dohořivací komory: 1100°C, výhřevnost pevného odpadu: 17 MJ/kg, výhřevnost kapalného odpadu: 33 MJ/kg.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Rédr, M., Příhoda, M.: Základy tepelné techniky. Praha.SNTL, 1991
ISBN 80-03-00366-0.
- [2] Sadik Kakac: Boilers, evaporators, condensers. John Willey. USA.New York 1991
CIP 90-22486 v knihovně VŠB-TU Ostrava.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



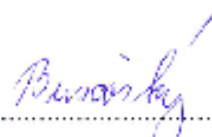

prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Míslopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité poznámky a literaturu.

V Ostravě 18.5.2015



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užití své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.5.2015


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jaromír Bušovec

Adresa trvalého pobytu autora práce:

U kříže 738

Ostrava

742 85

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. BUŠOVSKÝ, J., *Návrh rotační pece a dohořivací komory pro spalovnu nebezpečných odpadů : Diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 99 s, Vedoucí práce: Kolat. P.

Diplomová práce se zabývá návrhem koncepce a konstrukčním řešením rotační spalovací pece a dohořivací komory pro spalovnu nebezpečných odpadů. Úvod diplomové práce poskytuje všeobecné informace o nebezpečných odpadech a technologiích schopné nakládat s tímto typem odpadu. V úvodní části diplomové práce jsou rovněž poskytnuty informace týkající se pochodů v rotační peci, popisem technologické linky a metodickým postupem při návrhu termického bloku. Vlastní výpočtová část se soustřeďuje na návrh jednotlivých aparátů termického bloku s ohledem na dodržení požadované doby setrvání spalin v dohořivací komoře a teploty spalin na výstupu z dohořivací komory. Součástí diplomové práce jsou nezbytné tepelné výpočty.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Bc. BUŠOVSKÝ, J., *Proposal of Rotary Kiln for Hazardous Waste Incineration Plant : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2015, 99 p, Thesis head: Kolat, P.

Master thesis is dealing with proposal conception and structural design of a rotary kiln incinerator with the after-combustion chamber for the hazardous waste incineration plant. The introduction section provides general information about hazardous waste and technologies able to treat this kind of waste. The introduction section of the master thesis also provides information concerning processes in the rotary kiln, description of technology line and methodical procedure within thermal block design. The calculation part of the master thesis deals with design of particular equipment of thermal unit with regard to keeping required residence time in the after-combustion chamber and desired flue gas temperature in the after-combustion chamber output. Necessary heat calculations are also part of the master thesis.

OBSAH

Seznam použitého značení	9
1. Úvod	18
2. Spalování odpadů	21
2.1 Výhody a nevýhody spalování	21
Výhody spalování	21
Nevýhody spalování	22
2.2 Vliv spaloven na životní prostředí	22
2.3 Legislativa a emisní limity	23
3. způsoby spalování nebezpečného odpadu	26
3.1 Spalovny s rotačním ohništěm	26
3.2 Spalovny s fluidním ložem	26
3.3 Spalovny s roštovým ohništěm	28
3.4 Spalovny na spalování kapalných odpadů	28
3.5 Pyrolytické zplyňování	29
4. Základní teoretické principy spalovny s rotačním ohništěm	30
4.1 Fáze spalování odpadů	30
1. fáze – Vysušování odpadů	30
2. fáze – Přejít k hoření	30
3. fáze – Zapalování odpadů	31
4.2 Principy přenosu tepla u rotačních pecí	31
4.3 Pohyb částic při rotačním pohybu	32
4.4 Hlavní provozní parametry spaloven s rotační pecí:	33

5.	Popis technologického procesu spalovny s rotačním ohništěm	36
5.1	Dávkování odpadu	36
5.2	Rotační a dospalovací komora	37
5.3	Popis systému výroby páry:	40
5.4	Absorbér	41
5.5	Elektrostatický odlučovač	41
5.6	Dvoustupňová pračka spalin	42
6.	Metodika návrhu termického bloku linky pro spalování nebezpečných odpadů .	46
7.	Návrh spalovacího zařízení	51
7.1	Popis návrhu spalovacího zařízení.....	51
7.2	Spalovací režim v rotační peci.....	52
7.3	Volba spalovacího režimu v rotační peci	54
8.	Odvození základních spalovacích a tepelných výpočtů	55
8.1	Výpočet základních spalovacích rovnic	61
9.	Návrh jednotlivých částí rotační pece a dohořivací komory	71
9.1	Návrh hlavních rozměrů, otáček a sklonu rotační pece	71
9.2	Proudění spalin a pohyb materiálu v rotační peci	71
9.3	Vyzdívka rotační pece	74
9.4	Čelo rotační pece	78
9.5	Hlavní hořák.....	79
9.6	Hydraulické dávkovací zařízení	81
9.7	Násypka	81
9.8	Dohořivací komora.....	82
9.9	Vyzdívka dohořivací komory	83

9.10	Pomocný hořák v dohořívací komoře	86
9.11	Regulace spalovacího procesu	88
10.	Závěr	91
	Seznam použité literatury.....	92
	Seznam příloh.....	96

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

K	$[-]$	tuhý nespalitelný podíl v odpadu
K_1, K_2	$[-]$	konstanty pro Rossinovy – Freslingovy vzorce
K_3, K_4	$[-]$	konstanty pro Rossinovy – Freslingovy vzorce
$K_{1,RP}$	$[-]$	koeficient pro zařízení menších výkonů
$K_{2,RP}$	$[-]$	koeficient pro zařízení menších výkonů
L	$[mm]$	délka rotační pece
$P_{z,DK}$	$[W]$	tepelný tok dohořívací komorou
$P_{z,RP}$	$[W]$	tepelný tok rotační pecí
P_{1zp}	$[kW]$	tepelný výkon hlavního hořáku na zemní plyn
P_{2zp}	$[kW]$	tepelný výkon pomoc. hořáku na zemní plyn
Q_i	$[MJ / kg]$	výhřevnost i-té složky odpadu
Q_o	$[MJ / kg]$	celková výhřevnost odpadu
Q_{zp}	$[MJ / m_N^3]$	výhřevnost zemního plynu
$Q_{1,DK}$	$[kW]$	teplo přivedené odpadem z rotační pece
$Q_{2,DK}$	$[kW]$	teplo přivedené zemním plynem pomocného hořáku
$Q_{3,DK}$	$[kW]$	teplo odvedené spaliny v dohořívací komoře
$Q_{4,DK}$	$[kW]$	teplo odvedené tuhými zbytky v dohořívací komoře

Q_1	$[kW]$	teplo přivedené odpadem
Q_2	$[kW]$	teplo přivedené zemním plynem hlavního hořáku
Q_3	$[kW]$	teplo odvedené spaliny
Q_4	$[kW]$	teplo odvedené pláštěm rotační pece
Q_5	$[kW]$	teplo odvedené tuhými zbytky
R	$[m]$	poloměr rotační komory
$V_{CO_2}^o$	$[m_N^3 / kg]$	množství plynných složek CO_2 odpadu ve spalínách ze spalování odpadu
$V_{CO_2}^{zp}$	$[m_N^3 / m_N^3]$	Množství plynných složek CO_2 ze spalování zemního plynu ve spalínách
V_{DK}	$[m^3]$	objem dohořivací komory nad pomocným hořákem
V_{V1}	$[m^3 / s]$	průtok primárního spalovacího vzduchu při teplotě vzduchu t_{vz1} pro skutečný stav
V_{V2}	$[m^3 / s]$	průtok sekundárního spalovacího vzduchu při teplotě vzduchu t_{vz2} pro skutečný stav
V_{VN1}	$[m_N^3 / s]$	průtok primárního spalovacího vzduchu
V_{VN2}	$[m_N^3 / s]$	průtok sekundárního spalovacího vzduchu
V_s	$[m^3 / s]$	průtok spalin při t_{s2} pro skutečný stav
V_{sN}	$[m_N^3 / s]$	průtok spalin za dohořivací komorou

$V_{sp,o}$	$[m_N^3 / h]$	množství spalin ze spalovaného odpadu při hodinovém výkonu
$V_{sp,DK,max}$	$[m_N^3 / s]$	celkové množství spalin z odpadu a zemního plynu pro maximální výkon hlavního a pomocného hořáku
$V_{sp,DK,min}$	$[m_N^3 / s]$	celkové množství spalin z odpadu a zemního plynu pro minimální výkon hlavního a pomocného hořáku
$V_{sp,DK,sk,max}$	$[m^3 / s]$	skutečné množství spalin v dohořivací komoře pro maximální výkon hořáků při teplotě t_{s2}
$V_{sp,DK,sk,min}$	$[m^3 / s]$	skutečné množství spalin v dohořivací komoře pro minimální výkon hořáků při teplotě t_{s2}
$V_{sp,RP,max}$	$[m_N^3 / s]$	celkové množství spalin z odpadu a zemního plynu pro maximální výkon hlavního hořáku v rotační peci
$V_{sp,RP,min}$	$[m_N^3 / s]$	celkové množství spalin z odpadu a zemního plynu pro minimální výkon hlavního hořáku v rotační peci
$V_{sp,RP,sk,max}$	$[m^3 / s]$	skutečné množství spalin v rotační peci při teplotě t_{s1} pro maximální výkon hořáku
$V_{sp,RP,sk,min}$	$[m^3 / s]$	skutečné množství spalin v rotační peci při teplotě t_{s1} pro minimální výkon hořáku
$V_{sp,s,zp}$	$[m_N^3 / m_N^3]$	množství vzniklých spalin skutečných suchých
$V_{sp,v,o,c}$	$[m_N^3 / kg]$	celkové množství vlhkých spalin z odpadu

$V_{sp, v, zp, c}$	$[m_N^3 / m_N^3]$	celkové množství vniklých spalín skutečných vlhkých ze zemního plynu
$V_{sp, zp, max}$	$[m_N^3 / hod]$	množství spalín zemního plynu pro maximální výkon hlavního hořáku
$V_{sp, zp, min}$	$[m_N^3 / hod]$	množství spalín zemního plynu pro minimální výkon hlavního hořáku
$V_{sp, zp, DK, max}$	$[m_N^3 / hod]$	množství spalín zemního plynu v dohořivací komoře pro maximální výkon pomocného hořáku
$V_{sp, zp, DK, min}$	$[m_N^3 / hod]$	množství spalín zemního plynu v dohořivací komoře pro minimální výkon pomocného hořáku
$V_{vz, s, zp}$	$[m_N^3 / m_N^3]$	množství skutečného vzduchu suchého ze zemního plynu
$V_{vz, v, zp}$	$[m_N^3 / m_N^3]$	množství skutečného vzduchu vlhkého ze zemního plynu
V_w^o	$[m_N^3 / kg]$	množství vody ve spalínách z odpadu
V_w^{zp}	$[m_N^3 / m_N^3]$	množství vody ve spalínách ze zemního plynu
V_{zp}	$[m_N^3 / s]$	objemový průtok plynu hlavním hořákem
$V_{zp, max}$	$[m_N^3 / s]$	maximální objemový průtok zemního plynu hlavním/pomocným hořákem
$V_{zp, min}$	$[m_N^3 / s]$	minimální objemový průtok zemního plynu hlavním/pomocným hořákem
V_{zp2}	$[m_N^3 / s]$	objemový průtok plynu pomocným hořákem

$V'_{sp, s, o}$	$[m_N^3 / kg]$	teoretický objem suchých spalín z odpadu
$V'_{sp, s, zp}$	$[m_N^3 / m_N^3]$	teoretický objem vzniklých suchých spalín ze zemního plynu
$V'_{sp, v, o}$	$[m_N^3 / kg]$	teoretické množství vlhkých spalín z odpadu
$V'_{vz, s, o}$	$[m_N^3 / kg]$	teoretická spotřeba spalovacího vzduchu pro spalování odpadu
$V'_{vz, s, zp}$	$[m_N^3 / m_N^3]$	teoretická spotřeba suchého spalovacího vzduchu pro spalování zemního plynu
$V'_{vz, v, o}$	$[m_N^3 / kg]$	teoretická spotřeba vlhkého spalovacího vzduchu pro odpad
.....		
b_o	$[mm]$	šířka nosné obruče rotační pece
b_v	$[mm]$	šířka ozubeného věnce rotační pece
c_s	$[kJ / m_N^3 \cdot K]$	měrná tepelná kapacita spalín objemová
c_o	$[kJ / kg \cdot K]$	měrná tepelná kapacita odpadu
d_{DK}	$[mm]$	průměr dohořívací komory
d_1	$[mm]$	vnitřní průměr rotační pece
d_2	$[mm]$	vnitřní průměr rotační pece po izolační vyzdívce
d_3	$[mm]$	vnitřní průměr rotační pece po tepelnou izolaci
d_4	$[mm]$	vnitřní průměr rotační pece po ocelový plášť
d_5	$[mm]$	vnější průměr pláště rotační pece

d_6	$[mm]$	vnitřní průměr nosné obruče rotační pece
d_7	$[mm]$	vnější průměr nosné obruče rotační pece
g	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
h_{DK}	$[mm]$	výška dohořivací komory
$k_{l,DK}$	$[W \cdot m^{-1}]$	lineární součinitel prostupu tepla dohořivací komory
$k_{l,RP}$	$[W / m \cdot K]$	lineární součinitel prostupu tepla rotační pecí
m_i	$[kg]$	hmotnost i-té složky odpadu
m_o	$[kg / h]$	hmotový tok odpadu
m_1	$[kg]$	hmotnost vyzdívky 1. vrstvy rotační pece
m_2	$[kg]$	hmotnost izolační vyzdívky 2. vrstvy rot. pece
m_3	$[kg]$	hmotnost tepelné izolace rotační pece
m_4	$[kg]$	hmotnost ocelového pláště rotační pece
n	$[-]$	přebytek vzduchu
n_{ot}	$[ot / min]$	otáčky rotační pece
$n_{1,vz}$	$[-]$	skutečný přebytek primárního vzduchu v r. peci
$n_{2,vz}$	$[-]$	skutečný přebytek primárního vzduchu v dohořivací komoře
$q_{l,DK}$	$[W \cdot m^{-1}]$	lineární hustota tepelného toku při prostupu tepla složenou válcovou stěnou dohořivací komory

$q_{l,RP}$	$[W \cdot m^{-1}]$	lineární hustota tepelného toku při prostupu tepla složenou válcovou stěnou rotační pece
r	$[m]$	poloměr
r_{DK}	$[m]$	poloměr dohořívací komory
rLd_1	$[-]$	poměr délky a průměru rotační komory
t_{ok}	$[^{\circ}C]$	teplota okolí
t_{st}	$[^{\circ}C]$	teoretická teplota spalin
$t_{s,opt}$	$[^{\circ}C]$	optimální teplota spalin v dohořívací komoře
t_{s1}	$[^{\circ}C]$	teplota spalin na výstupu z rotační pece
t_{s2}	$[^{\circ}C]$	teplota spalin na výstupu z dohořívací komory
t_{sN}	$[^{\circ}C]$	teplota spalin za normálních podmínek
t_{vz1}	$[^{\circ}C]$	skutečná teplota primárního vzduchu
t_{vz2}	$[^{\circ}C]$	skutečná teplota sekundárního vzduchu
w_m	$[m/hod]$	postupná rychlost materiálu v rotační peci
w_{s1}	$[m/s]$	rychlost proudění spalin v rotační peci
w_{s2}	$[m/s]$	rychlost proudění spalin v dohořívací komoře
.....		
α_k	$[W / K \cdot m^2]$	součinitel přestupu tepla konvekci
α_o	$[W / K \cdot m^2]$	součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci
α_{RP}	$[W / K \cdot m^2]$	celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin v rotační peci

α_s	$[^\circ]$	sklon rotační pece
α_{sa}	$[W / K \cdot m^2]$	součinitel přestupu tepla sáláním
β	$[-]$	korekční součinitel pro záření plynů a par
β_s	$[-]$	koefficient zohledňující stupeň naplnění materiálu v rotační komoře
ε_{H_2O}	$[-]$	integrální emisivita vodní páry
ε_{CO_2}	$[-]$	integrální emisivita oxidu uhličitého
λ	$[W / m \cdot K]$	součinitel tepelné vodivosti
π	$[-]$	Ludolfovo číslo
ν	$[-]$	součinitel zvětšení objemu vlhkosti vzduchu
$\rho_{1.v}$	$[kg / m^3]$	objemová hmotnost 1. vrstvy vyzdívky
$\rho_{2.v}$	$[kg / m^3]$	objemová hmotnost 2. vrstvy vyzdívky
ρ_{ii}	$[kg / m^3]$	objemová hmotnost tepelné izolace
ρ_{Fe}	$[kg / m^3]$	objemová hmotnost oceli
τ_{DK}	$[s]$	doba setrvání spalin v dohořivací komoře
τ_1	$[\text{min}]$	doba setrvání materiálu v rotační peci
τ_2	$[s]$	doba setrvání spalin v dohořivací komoře
ω	$[s^{-1}]$	úhlová rychlost
ω_{CO_2}	$[\%]$	koncentrace složek CO_2 ve spalinách
ω_{H_2O}	$[\%]$	Koncentrace složek H_2O ve spalinách

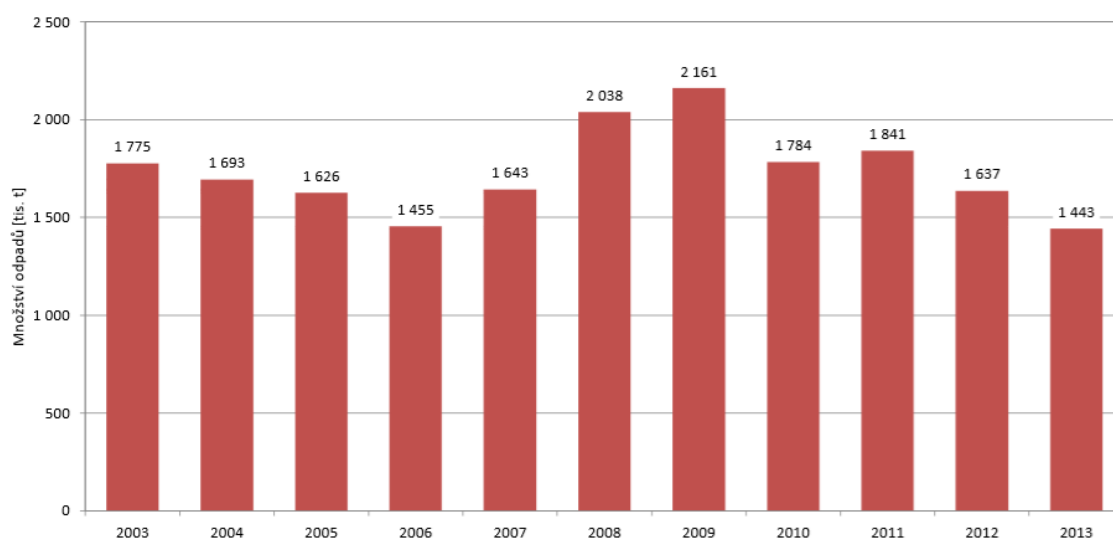
CH ₄	metan
C ₂ H ₆	ethan
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
H	vodík
HCl	kyselina chlorovodíková
HF	kyselina fluorovodíková
H ₂ O	voda
ePTFE	expandovaný polytetrafluorethylen
NaOH	hydroxid sodný
Na ₂ CO ₃	uhličitan sodný
Na ₂ SO ₃	siřičitan sodný
Na ₂ SO ₄	síran sodný
NO ₂	oxid dusičitý
PCDD	polychlorované dibenzo-p-dioxiny
PCDF	polychlorované dibenzofurany
SO ₂	oxid siřičitý
SO ₃	oxid sírový
TOC	celkový obsah organického uhlíku
TZL	tuhé znečišťující látky

1. ÚVOD

V České republice vzniklo v roce 2013 více než 1,4 mil. tun nebezpečných odpadů a tvoří 4,7% veškeré produkce všech odpadů. Navzdory tomu, že produkce nebezpečného odpadu v posledních letech trvale klesá, vyznačuje se tento druh odpadu negativním vlivem na životní prostředí a zdraví lidí nebo zvířat.

Nebezpečný odpad je ten, který dle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů („zákon o odpadech“), je každá movitá věc, který původce nebo oprávněná osoba jsou povinni pro účely nakládání s odpadem zařadit do kategorie nebezpečný pokud

- a) vykazuje alespoň jednu z nebezpečných vlastností uvedených v příloze č. 2 k tomuto zákonu,
- b) je uvedena v Katalogu odpadů jako nebezpečný odpad, nebo
- c) je smíšen nebo znečištěn některým z odpadů uvedených v Katalogu odpadů jako nebezpečný. [1]



Obrázek 1 - Celková produkce nebezpečných odpadů v ČR, 2003 – 2013 [2]

Nebezpečný odpad je odpad uvedený v Seznamu nebezpečných odpadů, které jsou uvedeny v předpise č. 381/2001 Sb., vyhlášky Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů). [3]

Odpad je hodnocen jako nebezpečný, pokud je překročeno jedno nebo více z kritérií nebezpečných vlastností odpadů, které jsou specifikovány v níže uvedené tabulce:

Tabulka 1 - Seznam nebezpečných vlastností odpadu [3] [6]

Kód	Nebezpečná vlastnost odpadu
H1	Výbušnost
H2	Oxidační schopnost
H3-A	Vysoká hořlavost
H3-B	Hořlavost
H4	Dráždivost
H5	Škodlivost zdraví
H6	Toxicita
H7	Karcinogenita
H8	Žíravost
H9	Infekčnost
H10	Teratogenita
H11	Mutagenita
H12	Schopnost uvolňovat vysoce toxické anebo toxické plyny ve styku s vodou, vzduchem nebo kyselinami
H13	Senzibilita
H14	Ekotoxická
H15	Schopnost uvolňovat nebezpečné látky do životního prostředí při nebo po odstraňování

Mezi významné producenty nebezpečných odpadů patří provozovatelé:

- chemických nebo petrochemických podniků (chemické látky)
- hutního a polygrafického průmyslu (těžké kovy)
- farmaceutického průmyslu (zbytky léčiv nebo látek související s výrobou léčiv)
- potravinářského průmyslu (organické látky)
- působících v zemědělství (pesticidy nebo zbytky hnojiv)

- stavebních podniků (azbest, barvy, laky)
- zdravotnických zařízení (zbytky léků, ostré předměty).

Mezi další původce nebezpečného odpadu taktéž zařazujeme odpady z domácností nebo obcí, který patří do kategorie nebezpečného komunálního odpadu. Mezi tyto odpady se zařazují látky nebo věci běžně využívané, měnící se postupně na odpad a který po uložení nebo poškození může sám uvolňovat nebezpečné látky nebo kontaminovat odpady, které nebyly původně klasifikovány jako nebezpečné a rovněž se tímto stávají nebezpečnými. Mezi tyto odpady nejčastěji řadíme produkty každodenní potřeby např. akumulátory, baterie, barvy, zbytky léčiv, oleje a tuky, lepidla, těkavé látky.

2. SPALOVÁNÍ ODPADŮ

Nebezpečný odpad se často vyskytuje jako směs pevné, pastovité a tekuté substance, včetně barelů, obsahující nebezpečný odpad např. odpady z nemocničního prostředí. Spalování je velice efektivní způsob pro destrukci nebezpečného organického odpadu redukující objem odpadu stejně jako jeho hmotnost, tedy pomáhá ke konečné likvidaci odpadu. Teplo, které vzniká spalováním odpadu se využívá pro výrobu elektřiny nebo procesního tepla nebo může být využito v jiných procesních zařízeních.

Z důvodu značného obsahu tekuté části, se pro tyto druhy odpadu často nevyužívá technologie roštového spalování. Mezi hlavní preferované technologie patří rotační pece, které pochází ze sektoru průmyslových pecí, kde jsou rotační pece využívány pro tepelné zpracování materiálu v průmyslovém odvětví např. výroba cementu. Většina rotačních pecí je umístěna v oblastech se silnou industriální zástavbou, které jsou většinou provozovány na komerční bázi a bývají umístěny v přímé blízkosti zdroje vzniku nebezpečného odpadu. Komerčně orientované zařízení přijímají a zpracovávají odpad za poplatek za účelem generace zisku. Ostatní spalovny nebezpečného odpadu zpracovávají odpad v příslušném zařízení, ve kterém jsou generovány.

Spalovny se posuzují podle jejich kapacity a druhu odpadů, které je možné spalovat, použitého typu spalovacího zařízení a využití odpadního tepla a způsobu čištění spalin. Městské spalovny, které jsou zařazovány do oblasti velkých spaloven mají nejčastěji kapacitu v rozmezí 15 – 60 t.h⁻¹ zpracovaného odpadu.

2.1 Výhody a nevýhody spalování

Výhody spalování

1. Spalování je rychlý způsob zneškodnění odpadů.
2. Spalováním se dosáhne podstatně účinnějšího snížení objemu odpadů než kompostováním nebo skládkováním. Zbytek po spálení tvoří 8 - 12% objemových a 25 - 40% hmotnostních složek původního podílu celkového odpadu.
3. Zbytek po spalování je tuhý, sterilní a nepodléhá rozkladu a limituje zdravotní rizika spalovaných odpadů. Pro likvidaci nebezpečného odpadu je zpravidla jedinou vhodnou variantou.

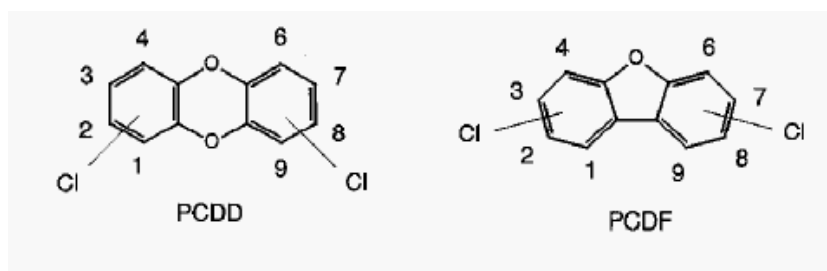
Nevýhody spalování

1. Vysoké investiční náklady na vybudování spalovny nebezpečných odpadů.
2. Potřeba kvalifikované obsluhy a operačního personálu pro provoz a údržbu spalovny.
3. Emise některých plyných škodlivin, které nelze dokonale odstranit.

2.2 Vliv spaloven na životní prostředí

Spalovny nebezpečných odpadů dramaticky snižují závadnost a toxicitu odpadu. V případě správného vedení spalovacího procesu se spálením zneškodní většina nebezpečných složek odpadů (hnilobné látky, organické sloučeniny), které ohrožují povrchové nebo podzemní vody. Přesto se spalování odpadů neobejde bez negativních účinků na životní prostředí. Mezi hlavní složky znečištění patří emisní složky a vzniklá škvára.

V průběhu spalovacího procesu některé organické látky, např. polychlorbifenyly a jiné obtížné oxidovatelné chlorované sloučeniny nejsou zcela termicky zlikvidovány a přecházejí do kouřových plynů nebo odpadní škváry. K minimalizaci znečištění kouřovými plyny se proto spalovny staví s dvoustupňovým čištěním spalín nebo třístupňovým, pro zachycení dioxinů a furanů zejména v případech, kdy je spalovna budována v městské zástavbě



Obrázek 2 - Molekulová struktura PCDD a PCDF

Je nepochybné, že jsou spalovny zdrojem znečištění prostředí. Snížení emisí na nulovou hodnotu je nereálné a je tedy přirozeným jevem všech fyzikálně-chemických procesů. V důsledku splnění všech požadavků na moderní způsob spalování zahrnující omezení vzniku a recyklaci odpadů jejich pozitivní účinek převládá. Emise vznikající ve spalovnách tvoří pouze malou část všech emisí elektráren, emisí z dopravy, průmyslu nebo lokálních topenišť.

2.3 Legislativa a emisní limity

V České republice se na ochranu ovzduší vztahuje zákon 483/2008 Sb. Nařízení vlády 354/2002 Sb. stanovuje emisní limity škodlivin [4]

Specifické emisní limity pro spalovny odpadu uvádí Příloha č. 5 k nařízení vlády č. 354/2002 Sb. [5]

Průměrné denní hodnoty

Tabulka 2 – Specifické emisní limity pro spalovnu odpadů – průměrné denní hodnoty [4]

1. Tuhé znečišťující látky celkem (TZL)	10 mg/m ³
2. Organické látky v plynné fázi vyjádřené celkovým obsahem organického uhlíku (TOC)	10 mg/m ³
3. Plynné sloučeniny chloru vyjádřené jako HCl	10 mg/m ³
4. Plynné sloučeniny fluoru vyjádřené jako HF	1 mg/m ³
5. Oxid siřičitý (SO ₂)	50 mg/m ³
6a. Oxid dusnatý a dusičitý vyjádřené jako NO ₂ pro stávající spalovny o jmenovité kapacitě nad 6 t/h a nové spalovny	200 mg/m ³
6b. Oxid dusnatý a dusičitý vyjádřené jako NO ₂ pro stávající spalovny o jmenovité kapacitě do 6 t/h	400 mg/m ³

Průměrné půlhodinové hodnoty

Tabulka 3 - Specifické emisní limity pro spalovnu odpadů – průměrné půlhodinové hodnoty[4]

	(100%) A	(97%) B
1. Tuhé znečišťující látky celkem (TZL)	30 mg/m ³	10 mg/m ³
2. Organické látky v plynné fázi vyjádřené celkovým obsahem celkového organického uhlíku (TOC)	20 mg/m ³	10 mg/m ³
3. Plynné sloučeniny chloru vyjádřené jako HCl	60 mg/m ³	10 mg/m ³
4. Plynné sloučeniny fluoru vyjádřené jako HF	4 mg/m ³	2 mg/m ³
5. Oxid siřičitý (SO ₂)	200 mg/m ³	50 mg/m ³

6. Oxid dusnatý a dusičitý vyjádřené jako NO ₂ pro stávající spalovny o jmenovité kapacitě nad 6 t/h a nové spalovny	400 mg/m ³	200 mg/m ³
---	-----------------------	-----------------------

Poznámka: S platností nejdéle do 1. ledna 2008 mohou být schváleny výjimky pro NO_x u stávajících spaloven o jmenovité provozní kapacitě mezi 6 a 16 tunami za hodinu, a to tak, že povolená průměrná půlhodinová hodnota ve sloupci A je nejvýše 600 mg/m³ a ve sloupci B 400 mg/m³.

Emisní limity těžkých kovů uvádí následující tabulka Průměrné hodnoty zahrnují i emise příslušných těžkých kovů a jejich sloučenin v plynné fázi. [4]

Tabulka 4 - Průměrné hodnoty během období odběru vzorků minimálně 30 minut a maximálně 8 hodin [4]

1. Kadmium a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Cd)	celkem 0,05 mg/m ³	celkem 0,1 mg/m ³
2. Thalium a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Tl)		
3. Rtuť a její sloučeniny	(vyjádřené obsahem Hg)	0,05 mg/m ³	0,1 mg/m ³
4. Antimon a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Sb)	celkem 0,5 mg/m ³	celkem 1 mg/m ³
5. Arzén a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem As)		
6. Olovo a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Pb)		
7. Chrom a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Cr)		
8. Kobalt a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Co)		
9. Měď a její sloučeniny	(vyjádřené obsahem Cu)		
10. Mangan jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Mn)		
11. Nikl a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Ni)		
12. Vanad a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem V)		

Emisní limit z průměrných hodnot součtového obsahu polychlorovaných dibenzodioxinů a dibenzofuranů naměřených ve vzorku odebraném během období nejméně 6 hodin a nejvýše 8 hodin, v němž jsou jednotlivé složky přepočteny pomocí koeficientů ekvivalentu toxicity podle přílohy č. 1 k tomuto nařízení [4]

Dioxiny a furany	0,1 ng TE /m ³
------------------	---------------------------

Emisní limity oxidu uhelnatého (CO) ve spalínách během provozu spalovny (mimo dobu spouštění a odstavování):

1. 50 mg/m³ při stanovení průměrné denní hodnoty,
2. 150 mg/m³ u minimálně 95 % všech stanovení průměrné desetiminutové hodnoty nebo 100 mg/m³ u všech stanovení průměrné půlhodinové střední hodnoty provedených během každého období 24 hodin. [4]

3. ZPŮSOBY SPALOVÁNÍ NEBEZPEČNÉHO ODPADU

Pro spalování nebezpečného odpadu jsou využívány různé druhy zařízení. Mezi alternativní zařízení umožňující spalování nebezpečných odpadů patří spalovny na tekuté substance, spalovny odpadů s technologií fluidního lože, v malé míře i spalovny s roštovým ohništěm a pyrolýzní zplyňování. Nicméně nejvýznamnější podíl v oblasti komerčních spaloven jsou spalovny s rotačním ohništěm.

3.1 Spalovny s rotačním ohništěm

Rotační pece jsou běžně užívanou technologií pro zpracování nebezpečného odpadu. Hlavním důvodem je schopnost zpracovávat prakticky jakoukoli představitelnou formu odpadu, např. objemný odpad, odpad v kontejnerech, kaly, kejdy, tekutiny obsažené v kontejnerech, jakožto i méně běžné odpady (nervová činidla). Stejně dobře je možné zpracovat odpady z široké oblasti organických odpadů, halových prvků a odpady proměnlivých výhřevností. Tato technologie je detailně popsána dále v textu.



Obrázek 3 – Protiproudá rotační pec firmy Maguin [42]

3.2 Spalovny s fluidním ložem

Fluidní lože jsou příležitostně používány pro spalování nebezpečného odpadu, nicméně ne tak často jako klasické rotační pece nebo spalovny na vstřikování tekutého odpadu.

Spalovny s fluidním ložem se skládají z reaktoru vytvářející fluidního lože, vzduchového ventilátoru vytvářejícího fluidní vrstvu, systému dávkování odpadu a pomocného systému dávkování.

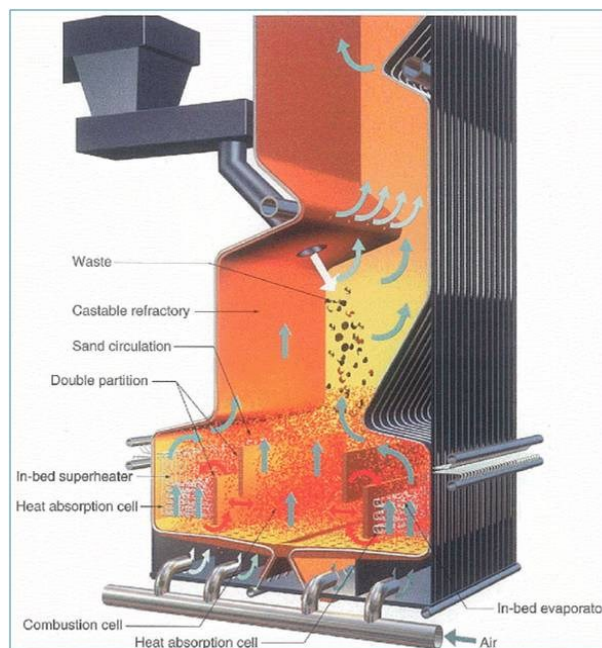
Pevné odpady, tekuté a plynné odpady jsou dopravovány do fluidního lože, kde se smíchají se spalovacím vzduchem a žhavým fluidním materiálem, kde hoří. Odpad je dávkován tak, aby byl v přímém kontaktu s fluidním materiálem. Fluidní materiál způsobuje povrchu odpadu abrazi a napomáhá rychlejšímu spalování odpadu. Odpad a pomocné paliva jsou vstřikovány radiálně do lože při teplotě do 950°C. Odpadní popel a fluidní materiály jsou odstraňovány ze dna reaktoru, část je unášena spaliny.

Obecně jsou spalovny s fluidním ložem vybaveny odlišným dávkovacím systémem pro pevný odpad a odpad kapalný. V některých případech může spalovna s fluidním ložem obsahovat až čtyři systémy dávkování odpadu do reaktoru, pevné odpady v mokré formě, suché pevné odpady, viskózní tekutiny a neviskózní tekutiny.

Pevný odpad je obvykle dávkován do drtícího zařízení, ze kterého padá dále do třídiče, který separuje lehké a těžké částice. Lehké částice jsou přenášeny do sekundárního drtiče, ze kterého jsou dopravovány do výsyvky pevného odpadu a dávkovány do fluidního lože.

Kapalný odpad je napřed přečerpán do nádrže, ve které se zajistí homogenizace směsi. Čerpadlo dávkuje kapalný odpad do reaktoru, ve kterém je distribuován pomocí nátrubků a atomizován do fluidního lože.

Z důvodu účinného mísení jsou fluidní lože obvykle provozovány za nižších teplot v porovnání s ostatními technologiemi spalování. Toto opatření zabraňuje vzniku nižších emisí oxidů dusíku, emisí těkavých kovů a nižší tvorbu popelových nánosů. Použití vápence umožňuje snižovat vytváření kyselých plynů při zpracování odpadů s vyšším obsahem síry a halogenů. [9] [10]



Obrázek 4 – Spalovací komora fluidního kotle na odpady [43]

Fluidní lože nejsou dost vhodné pro nesteroidné odpady, objemné odpady nebo odpady s vysokým obsahem tavitelného popela.

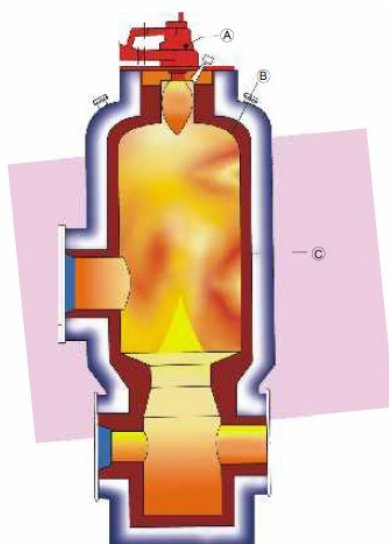
3.3 Spalovny s roštovým ohništěm

Roštová spalovací zařízení fungují na principu spalování pevných paliv na roštnici. Typicky se užívají válcové a vratisuvné rošty. Součástí spalovny je kotel na odpadní teplo na výrobu páry nebo horké vody, který zároveň slouží jako dohořivací komora pro likvidaci škodlivin vzniklých při spalování na roštu. Mezi charakteristické vlastnosti roštové spalovny patří vysoký spalovací výkon, jednoduchá a robustní konstrukce, vyšší požadavky na regulaci spalovacího procesu a problematické dávkování pastovitých a kapalných odpadů. Z tohoto důvodu jsou pro spalování nebezpečných odpadů využívány minimálně. [9] [10] [8]

3.4 Spalovny na spalování kapalných odpadů

Stejně jako spalovny s rotačním ohništěm jsou i spalovny kapalného odpadu často využívány pro spalování nebezpečných odpadů. Tyto spalovny mohou zpracovat prakticky jakoukoli spalitelnou tekutinu nebo odpad na bázi tekutiny (kašovitý odpad, kaly).

Spalovna na spalování kapalných odpadů zahrnuje spalovací komoru kapalných odpadů, systém přívodu pomocného paliva, systém dávkování spalovacího vzduchu. Vlastnímu dávkování kapalného odpadu napomáhá přívod páry nebo vysokotlakého vzduchu, pomocí kterých je odpad v přívodním nátrubku do spalovací komory atomizován a je smícháván se spalovacím vzduchem. Díky relativně vysoké ploše povrchu se atomizované částice rychle vypaří za vzniku vysoce spalitelné směsi odpadních výparů a spalovacího vzduchu. [10] [8]



Obrázek 5 - Spalovací komora spalovny kapalných odpadů [44]

V případě, že energetický obsah odpadu není dost vysoký k zajištění přiměřeného vznícení a spalovacích teplot je nutné dávkovat pomocné palivo ve formě palivového oleje nebo zemního plynu. V některých případech jsou odpady s vysokým obsahem pevných částic filtrovány před spálením z důvodu zamezení ucpání přívodního nátrubku. Odpady s vysokým obsahem pevných částic jsou filtrovány před vstupem do zásobní nádrže.

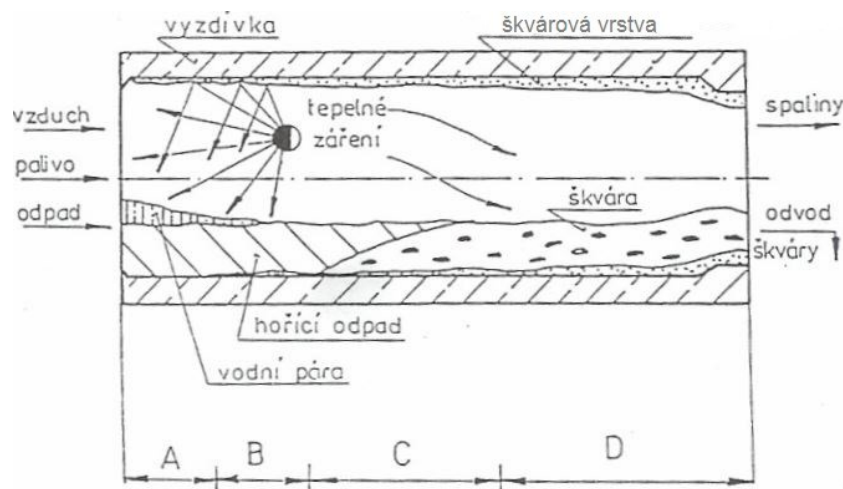
Vlastní spalovna může být orientována horizontálně nebo vertikálně.

3.5 Pyrolytické zplyňování

Spalování probíhá ve dvou fázích. V první fázi dojde ke zplynění odpadu za nedostatku vzduchu. Ve druhé fázi je přiváděn vzduch a dochází k vlastnímu spalování. Výhodou tohoto spalování je menší objem komory a nižší objem kouřových plynů. Nevýhodou je vyšší obsah škodlivin.

4. ZÁKLADNÍ TEORETICKÉ PRINCIPY SPALOVNY S ROTAČNÍM OHNIŠTĚM

Spalovny s rotačním ohništěm jsou běžně užívanou technologií pro zpracování nebezpečného odpadu. Hlavním důvodem je schopnost zpracovávat prakticky jakoukoli představitelnou formu odpadu, např. objemný odpad, odpad v kontejnerech, kaly, kejdy, tekutiny obsažené v kontejnerech, jakožto i méně běžné odpady (nervová činidla). Stejně dobře je možné zpracovat odpady z široké oblasti organických odpadů, halových prvků a odpady proměnlivých výhřevností.



Obrázek 6 – Spalovací pochody v rotační peci [11] [6]

4.1 Fáze spalování odpadů

Spalování v rotační peci se uskutečňuje v šesti fázích: [6]

1. fáze – Vysušování odpadů

Odpady se vysušují sáláním plamene, odraženým sáláním od vrchní vyzdívky, vedením tepla spodní části vyzdívky a sdílením tepla vzduchem, který proudí při povrchu odpadového lože, který je ve stálém pohybu.

2. fáze – Přechod k hoření

Ke všem způsobům sdílení tepla zde ještě působí spalovací vzduch, který napomáhá sdílením tepla ohřívat lože a začíná odplyňovat odpad.

3. fáze – Zapalování odpadů

Vznikají ohniska hoření, které se přemísťují a shlukují pohybem pece. Lože se postupně zapaluje a plameny se zvětšují vlivem přijímání kyslíku ze vzduchu a nárůstem tepla.



Obrázek 7 – Spalovací proces uvnitř rotační pece [12]

4. fáze – Prohořívání a zplyňování odpadů

Zvýšením teploty a shlukováním ložisek hoření prohořívá celé odpadové lože, které se z vnitřních vrstev odplyňuje.

5. fáze – Hoření a spalování plynů

Vzniklé hořlavé plyny i zkoksované části vyhořívají vzduchem, který se průchodem spalovacího prostoru silně ohřál.

6. fáze – Vyhořívání

Hořlavé zbytky odpadů spotřebovávají kyslík ze silně přehřátého vzduchu a ze silně oxidačního plamene. V této fázi je největší nebezpečí tavení popela. Z toho důvodu, že u rotačních pecí pracujících v souproudém režimu není možné přivádět různé množství spalovacího vzduchu do jednotlivých pásem, musí se na vstupu do pece přivádět takové množství vzduchu, které zabezpečí pro všechny fáze dostatečný přebytek.

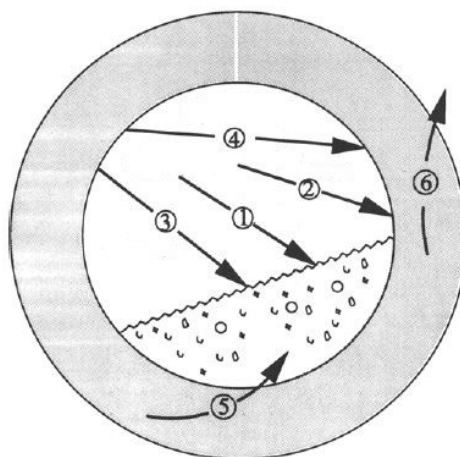
4.2 Principy přenosu tepla u rotačních pecí

Mechanismy přenosu tepla uvnitř rotační pece jsou velice komplexní a zahrnují společné působení radiace, konvekce a kondukce k přenosu tepla ze spalin do stěny

komory a spalovaného odpadu. Za vyšších spalovacích teplot je převládajícím jevem přenosu tepla radiace. Hlavním zdrojem tepla jsou plyny, které zásobují teplem pevné částice a odjímají teplo spalínovým plynům. Po odejmutí tepla ze spalín se toto teplo přenáší radiací prostřednictvím stěny spalovací komory do ložového materiálu a na spodní plochu ložového materiálu prostřednictvím rotace pece a kondukce. Část tepla je odváděno skrz plášť komory do okolí pece a způsobují tímto tepelné ztráty.

Na níže uvedeném obrázku jsou naznačeny základní způsoby tepelných přenosů, kde číslování jednotlivých odstavců odpovídá číslování tepelných přenosů na obrázku.

1. Působení spalín radiací a konvekcí na ložový materiál
2. Působení spalín radiací a konvekcí na stěnu rotační komory
3. Působení stěny rotační komory radiací na ložový materiál
4. Vzájemná radiace plochy stěn spalovací komory
5. Společné působení konvekce, radiace a nestálé kondukce
6. Tepelné ztráty do okolí kondukací



Obrázek 8 - Základní způsoby tepelných přenosů [13] [14]

4.3 Pohyb částic při rotačním pohybu

Existují různé způsoby pohybu pevných částic uvnitř rotační pece. Pohyb částic v komoře závisí na bezrozměrné hodnotě Froudova čísla, charakterizující hydrodynamické jevy, v nichž rozhodují síly setrvačné a tíha vyjádřené vztahem [13] [14]

$$F = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \quad [-] \quad (1)$$

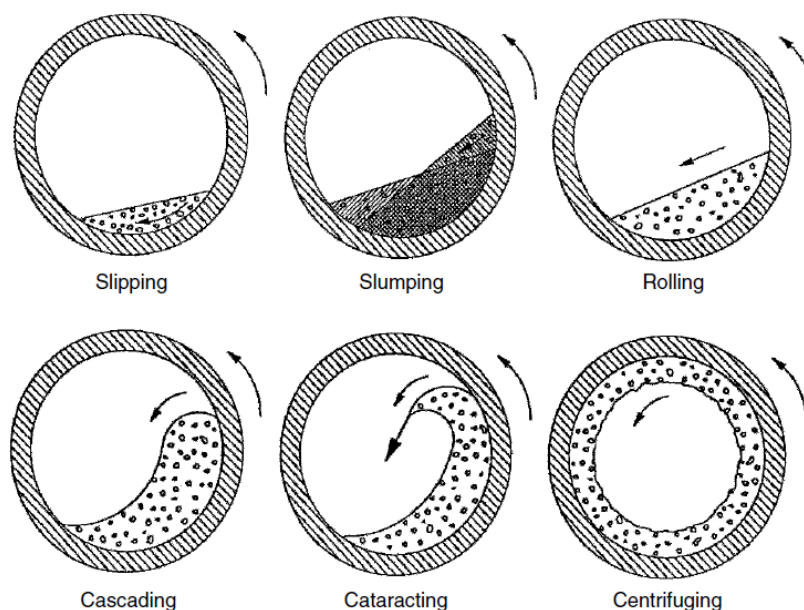
Kde:

ω úhlová rychlost $[s^{-1}]$

R poloměr rotační komory $[m]$

g gravitační zrychlení $[m \cdot s^{-2}]$

Teoreticky může v rotační peci nastat šest rychlostních režimů



Obrázek 9 - Různé režimy provozu rotační pece [13] [14]

Poznámka k obrázku (*slipping* – klouzání, *slumping* – sesouvání, *rolling* – rolování, *cascading* – vrstvení, *cataracting* – padání, *centrifuging* – odstředování)

1. Klouzání – materiál jako celek klouže po stěně pece
2. Sesouvání – část materiálu se oddělí a sesouvá po stěně pece
3. Rolování – materiál je trvale promícháván na stěně pece
4. Vrstvení – při vyšších rotacích, kdy se jednotlivé částice vrství nebo se volně sesypávají
5. Padání – přechod mezi vrstvením a odstředováním
6. Odstředování – nastává při vysokých rychlostech, veškerý materiál rotuje spolu s vnitřním povrchem pece

4.4 Hlavní provozní parametry spaloven s rotační pecí:

1. Výstupní teplota rotační pece a dospalovací komory

Teplota je typicky udržována nad teplotou 815°C. Teplota musí být udržována nad touto minimální hodnotou zaručující dostatečnou likvidaci hlavních nebezpečných organických složek a za účelem vyvarování se formování produktů nedokonalého spálení. Teplota spalovacího procesu může být kontrolována prostřednictvím dávkování odpadu, pomocného paliva a dávkováním spalovacího vzduchu.

2. Tlak v rotační peci a dohořivací komoře

Tlak musí být udržovaný negativní vzhledem k atmosféře k zamezení vzniku nebezpečných emisí prostřednictvím netěsností v rotační komoře. Tlak je kontrolován pomocí spalínového ventilátoru a systémem klapek spalovacích vzduchů

3. Rychlost kouřových plynů

Kontroluje se z důvodu požadovaného zdržení spalin za provozních teplot pro kompletní likvidaci prchavých složek. Rychlost spalování je závislá na složení odpadu dávkovaného do rotační pece a jeho dávkovacím poměru, na pomocném palivu a přiváděného spalovacího vzduchu.

4. Dávkování odpadu

Slouží k zamezení předávkování pece, vzniku přetlaku, vzniku atmosféry chudé na kyslík a nadměrného vzniku prchavých složek spalin. V případech, kdy je pec dávkována přerušovaně je nutné kontrolovat maximální velikost příslušné dávky.

5. Hladina kyslíku v peci a na výstupu z dospalovací komory

Hladinu kyslíku je nutné kontrolovat z důvodu zajištění dostatečného množství kyslíku, tedy dostatečného potenciálu pro kompletní vyhoření odpadu (nižší produkce CO, uhlovodíků).

6. Úroveň oxidu uhelnatého a uhlovodíků ve spalinách

Oxid uhelnatý a uhlovodíky jsou monitorovány z důvodu správného provozu pece a dohořivací komory a případného vyvarování se formaci produktů nedokonalého spalování.

7. Doba zdržení pevných částic v rotační peci

Typická doba zdržení se pohybuje v rozmezí od 30 minut do 90 minut a je zabezpečena poměrem otáček pece a sklonu pece tak, aby byl dosažen požadovaný čas

zdržení pro odpad, který je v rotační peci právě zpracováván. Kontrola doby zdržení je důležitá i z důvodu zpracování těžko spalitelných odpadů.

8. Mísení pevných částic v peci a spalovacího vzduchu

Mísení zajišťuje dokonalé spálení prchavých složek odpadu díky mísení spalovacího vzduchu a odpadu.

5. POPIS TECHNOLOGICKÉHO PROCESU SPALOVNY S ROTAČNÍM OHNIŠTĚM

Vlastní technologický proces spalovny odpadů s rotačním ohništěm se skládá z jednotlivých, na sebe navazujících zařízení, počínající dávkováním odpadu do spalovací jednotky, až po opuštění spalin ze zařízení ve formě vyčištěných spalin.

5.1 Dávkování odpadu

Pevné a tekuté odpady jsou dávkovány přímo do rotační pece buď kontinuálně nebo přerušovaně. Pevné odpady mohou být dávkovány pístovým podavačem, šnekovým nebo pásovým dopravníkem. V případě dávkování šnekovým dopravníkem musí být zajištěno dávkování odpadu tak, aby nedocházelo k přisávání falešného vzduchu skrz dávkovací zařízení. Tekutý odpad může být vstřikován pomocí páry nebo pomocí rozstřikovací trysky přímo do rotační pece skrz hlavní hořák nebo může být smícháván s hlavním tuhým odpadem. Na hladší provoz rotační pece může mít vliv jeho předběžná úprava odpadu spočívající jejich drcení nebo neutralizaci korozivních odpadů.



Obrázek 10 - Pohled na bunkr ve spalovně Termizo Liberec [15]

5.2 Rotační a dospalovací komora.

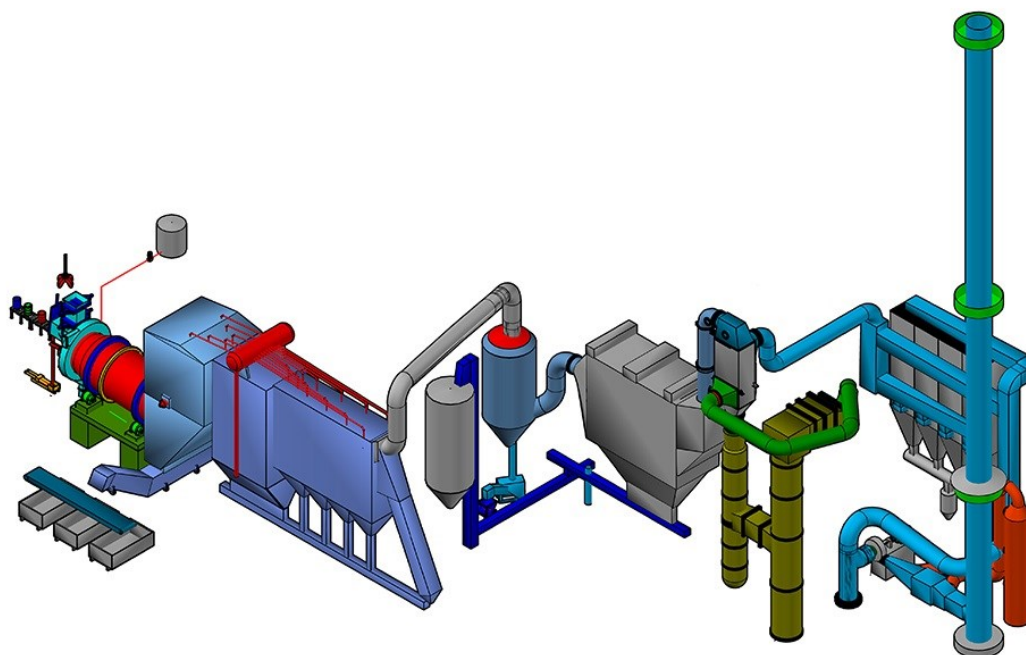
Typické spalovací zařízení s rotačním ohništěm určené ke spalování nebezpečného odpadu se skládá z rotační a dospalovací komory. Rotační komora je válcovité žáruvzdorné těleso s poměrem délky a průměru v poměru od 2:1 do 10:1. Plášť je podporovaný dvěma nebo více ocelovými věnci, které umožňují rotační komoře rotovat kolem své vodorovné osy.

Obvykle je rotační pec konstruována se sklonem 2° - 4° od své horizontální roviny s otáčkami v rozsahu 0,5 – 2 otáčky za minutu. Sklon pece a volba otáček pomáhá k celkovému promísení odpadu se spalovacím vzduchem, usnadňuje přenos tepla mezi odpadem a horkým vzduchem, plamenem a vyzdívkou a usnadňuje přesun odpadu uvnitř rotační komory.



Obrázek 11 – Protiproudá rotační pec firmy BIC Group [16] [35]

Spalovací jednotky rotačních pecí jsou projektovány v souproutém nebo protiproudém režimu. V rámci protiproudého řešení je odpad dávkován na protější straně hořáku s tím, že odpad proudí ve směru sklonu pece směrem k hořáku, zatímco spaliny jsou odváděny v opačném směru. V souproutém režimu je dávkování odpadu vedeno na straně hořáku a odpad se přesouvá dolů ve směru sklonu rotační komory. Většina rotačních pecí je navržena v protiproudém režimu, který umožňuje rychlejší zapalování dávkovaného odpadu a zabezpečuje delší dobu zdržení spalin v porovnání se souproutovým režimem.



Obrázek 12 - Schéma technologie spalovny s rotačním ohništěm [17]

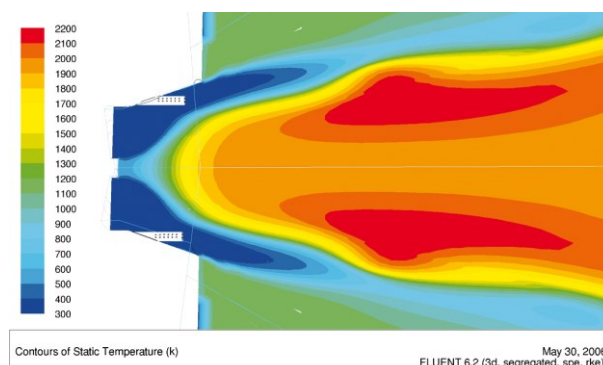
Odpady jsou v peci ohřívány plamenem, spaliny a vyzdívkou. Prostřednictvím postupného odpařování a tepelně-chemických reakcí jsou spalitelné složky odpadu zplyňovány. Pevné spalitelné složky odpadu se dále ohřívají a spalují ve směru sklonu pece. Typická doba zdržení pevných částic se pohybuje v rozmezí od 30 minut až do 90 minut, zatímco doba zdržení spalin v rotační peci je obvykle kolem dvou sekund. Dávkování odpadu je zajištěné takovým způsobem, aby jeho množství nepřesáhlo hodnotu 20% objemu vnitřního prostoru pece.



Obrázek 13 – Spalovna s rotační pecí firmy Mitsubishi [12]

Pomocný plynový nebo olejový hořák, je umístěný na dávkovací straně odpadu do rotační pece, který v rámci najíždění zařízení přivádí rotační pec na potřebnou teplotu.

Současně udržuje teplotu na požadované hodnotě v případech, kdy není možné hlavním odpadem zajistit dostatečný tepelný vstup. Spalovací vzduch je připádněn do pece skrz vstupní otvory na čele rotační pece nebo skrz otvory na obvodu pece. Pec se typicky provozuje s 50 až 200% přebytkem vzduchu.



Obrázek 14 - Ilustrační obrázek simulace plamene k optimalizaci tepelných přenosů v rotační peci [18]

Provozní tlak pece je udržován v negativní atmosféře v rozmezí od -0,001 baru do 0,005 barů prostřednictvím spalínového ventilátoru, který je umístěn dále ve směru toku spalin. Provoz v negativní atmosféře zajišťuje, aby se zamezilo průsaku nebezpečných fugitivních emisí spalin do atmosféry skrz průsaky v těsnění rotačních částech, např. při vzniku nadměrného vnitřního tlaku, který může vzniknout dávkováním vysoce výhřevných nebo explozivních materiálů.

Anorganické látky, popel, struska a další nespálené složky, které dosáhnout konce rotační komory padají gravitací do škvárové jímky. Obvykle je škvára uhašena ve vodní jímce, která je vybavena vodním tlakovým uzávěrem k zamezení přisávání falešného vzduchu.

Výstupní spaliny z rotační části jsou odváděny do dospalovací komory. Dospalovací komora je typicky provozována za teplot od 1100°C do 1370°C se 100-200% přebytkem vzduchu a dobou zdržení spalin od jedné do tří sekund, která slouží k dokonalému vyhoření zbývajících nespálených složek spalin, zejména různých forem uhlovodíků a oxidu uhelnatého. Přídavnými hořáky dochází ke zvýšení teploty v dohořivací komoře na požadovanou úroveň. V případě spalování odpadu v rotační peci za nižší teploty je nutné v dohořivací komoře spalovat vyšší množství přídavného paliva. Spotřeba přídavného paliva v dohořivací komoře roste se snižující teplotou v rotační peci a s rostoucí výhřevností odpadu.

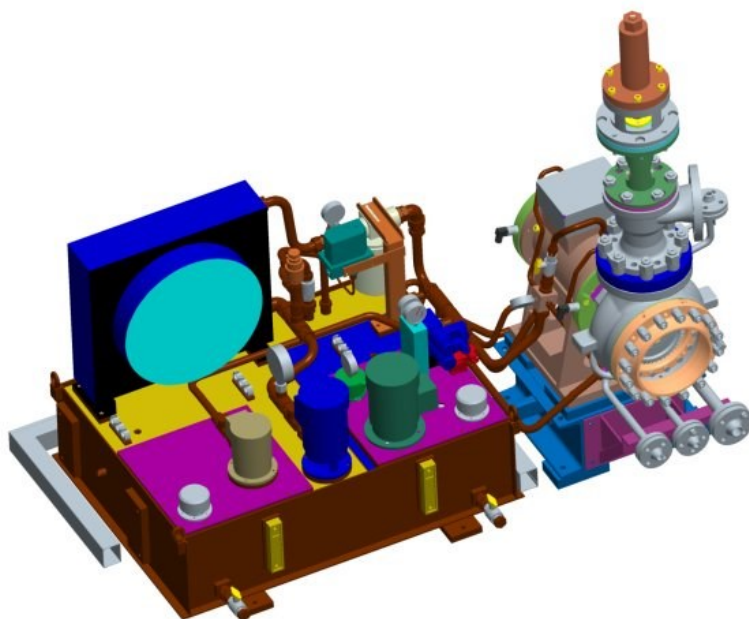
Ve střední části dohořivací komory jsou zaústěny průchody určené pro instalaci trysek systému nekatalytického odstraňování oxidů dusíku (SNCR).

5.3 Popis systému výroby páry:

Vyhořelé spaliny postupují ze spalovacího prostoru a dohořivací komory do kotle na odpadní teplo. V dohořivací komoře je snímána a hlídána teplota spalin a podtlak, který je vytvářen sacím ventilátorem vyčištěných spalin. Podtlak ve spalovacím prostoru, následně v kotli na odpadní teplo a v zařízení čištění spalin je regulován výkonem spalinového ventilátoru.

V kotli na odpadní teplo umístěn přehřívák, výparník, ekonomizér a ohřívák vzduchu parního kotle. Na výstupu z konvekční části je snímána teplota. V konvekční části kotle na odpadní teplo jsou spaliny postupně ochlazovány z 1100°C na teplotu při které jsou odváděny do části čištění spalin.

Na parním výstupu kotle, v parním bubnu, vzniká středotlaká, sytá pára, která je dále v přehříváku páry přehřívána na jmenovité parametry tlaku a teploty pro expanzi v turbíně nebo točivé redukci. Teplota páry je regulována nástřikem napájecí vody.



Obrázek 15 - Točivá redukce TR Hi 150 [19]

Kotel na odpadní teplo je ve své druhé části vybaven systémem automatického čištění trubek ofukem tlakovou párou. Napájecí voda do kotle je dodávána prostřednictvím napájecích čerpadel.

Na výstupu spalin z kotle je snímána teplota, tlak, obsah kyslíku a oxidu uhelnatého. Tyto veličiny jsou integrovány do regulace výkonu spalovacího procesu rotační pece. Teplota spalin je regulována na konstantní hodnotě připojováním případně odpojením

části výměnných ploch kotle, tj. použitím regulovaného ekonomizéru resp. použitím regulovaného předehřívače napájecí vody.

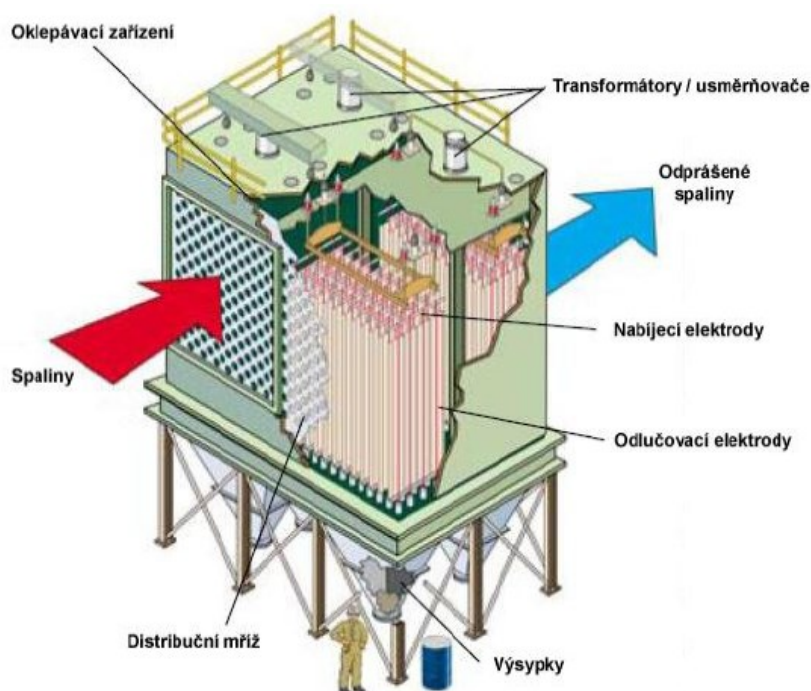
Část popílku unášeného spaliny je odlučována v konvekční části kotle a shromažďována ve výsypkách kotle, odkud je odváděn systémem pneumatické dopravy. Odtud je popílek dále plněn do transportního zásobníku.

5.4 Absorbér

Absorpční činidlo se ve formě suspenze nebo roztoku vstříkuje do proudu horkých spalin v rozprašovacím reaktoru. Absorpční rozpouštědlo je vlivem proudem horkých spalin odpařeno, takže vzniklé reakční produkty jsou v tuhém skupenství. Vzniklý prach, na který jsou absorbovány škodliviny je ze spalin odstraněn v elektrostatickém odlučovači.

5.5 Elektrostatický odlučovač

Spaliny obsahující popílek vstupují do rozdělovacích sekcí elektrostatického odlučovače, kde jsou rovnoměrně distribuovány do jednotlivých řad odlučovače.



Obrázek 16 – Elektrostatický odlučovač [20]

Spaliny následně proudí horizontálním směrem a prochází elektrickým polem generovaným elektrodami uspořádanými v řadách. Elektrody jsou nabíjeny stejnosměrným proudem. Na elektrodách je generováno napětí až 65 000 V.

Intenzivní elektrické pole ionizuje molekuly plynů v proudu spalin. Ionizované částice proudí směrem k odlučovacím elektrodám a srážejí se s částicemi popílku unášeného proudem spalin. Částice popílku stykem s ionizovanými molekulami získávají záporný elektrický náboj a jsou přitahovány k odlučovacím elektrodám, kde se zachycují. Tuhé částice zachycené na odlučovacích elektrodách jsou následně periodicky shazovány do výsypek oklepávacím zařízením.

5.6 Dvoustupňová pračka spalin

Pračka spalin je koncipována jako válcová nádoba o několika sekcích po její výšce. Spaliny vstupují do pračky v její horní části a proudí směrem dolů, přičemž postupně procházejí jednotlivými funkčními stupni pračky, ve kterých jsou ze spalin odstraňovány obsažené škodliviny, především kyselé složky a těžké kovy.

První stupeň mokré pračky

V prvním stupni pračky jsou spaliny nejprve zkrápěny prací vodou. Voda je rozprašována tryskami rozmístěnými na nosném prstenci, které rozstříkem pokrývají celý průřez pračky a vytváří tak hustou vodní clonu.

Díky vysoké rozpustnosti chlorovodíku (HCl) a fluorovodíku (HF) ve vodě dochází k jeho vyloučení ze spalin a jejich koncentraci v prací vodě. Rovněž dochází k odloučení majoritního množství těžkých kovů. V tomto stupni pračky dochází částečně i k odloučení oxidu siřičitého (SO₂), nicméně jedná se pouze o zanedbatelný podíl. Většina SO₂ je odlučována v následném stupni. Ve spodní části prvního stupně je integrována záchytná vana, ve které je akumulována stékající prací voda, která je recirkulována zpět pro zástřík prvního stupně pračky.

Druhý stupeň mokré pračky

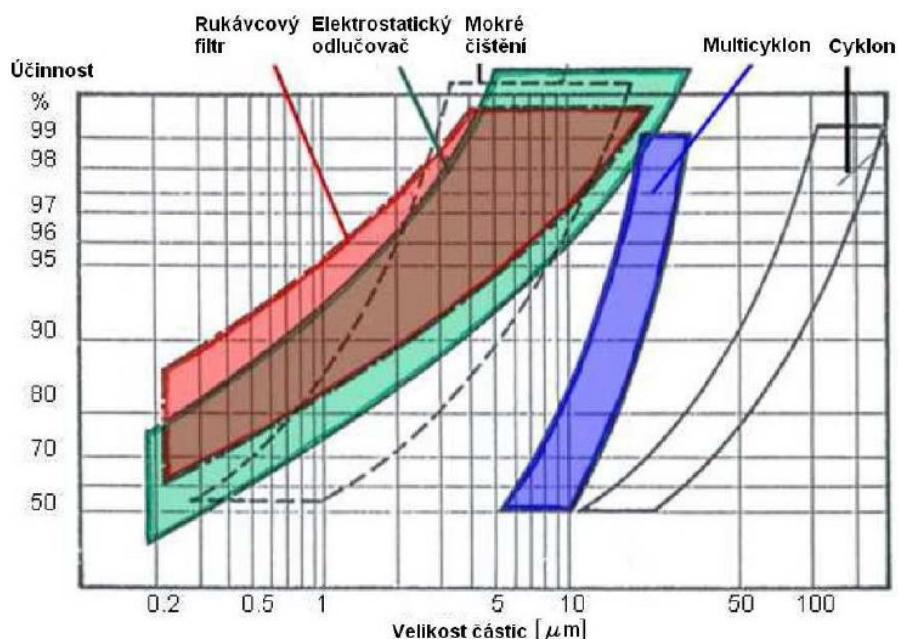
Spaliny vystupující z prvního stupně pračky a postupují do následného stupně pračky, který slouží především k neutralizaci a odlučování SO₂ ze spalin a zároveň k odstranění zbytkového množství HCl a HF.

Spaliny proudí reakční vrstvou směrem vzhůru proti přirozenému proudu pracího roztoku distribuovaného na reakční vrstvu shora dolů. Toto uspořádání zajišťuje dostatečnou reakční plochu a dobu setrvání spalin pro styk s pracím roztokem.

Do pracího roztoku je v tomto stupni pračky dávkován hydroxid sodný. Množstvím dávkovaného hydroxidu a poměrem pracího roztoku a množství spalin je možné regulovat pH v tomto stupni pračky na optimální úrovni z hlediska odstraňování emisí SO_2 . V tomto stupni je do pracího roztoku rovněž aplikováno aktivní uhlí, které je mícháno s neutralizačním roztokem v provozní nádrži. Aktivní uhlí slouží k odstranění případných zbytkových množství těžkých kovů.

Stékající prací roztok je zachycován ve spodní části druhého stupně pod reakční vrstvou a gravitačním způsobem sváděn potrubím zpět do provozní nádrže.

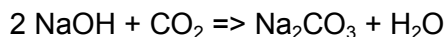
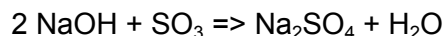
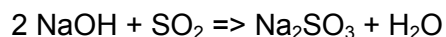
Výstupní lamelový separátor kapek zabraňuje únosu kapek, případně částic aktivního uhlí z výstupu pračky dále do kouřovodů a spalinového ventilátoru. Zachycené látky jsou odváděny zpět do provozní nádrže.



Obrázek 17 – Porovnání účinnosti čištění spalin v závislosti na velikosti TZL [21]

Odstraňování kyselých složek spalin je realizováno chemickými reakcemi s hydroxidem sodným, které je rozprašován do zavířeného proudu spalin v rozprašovacím skrubru.

Produktem základních chemických reakcí probíhajících ve skrubru jsou různě nasycené soli:

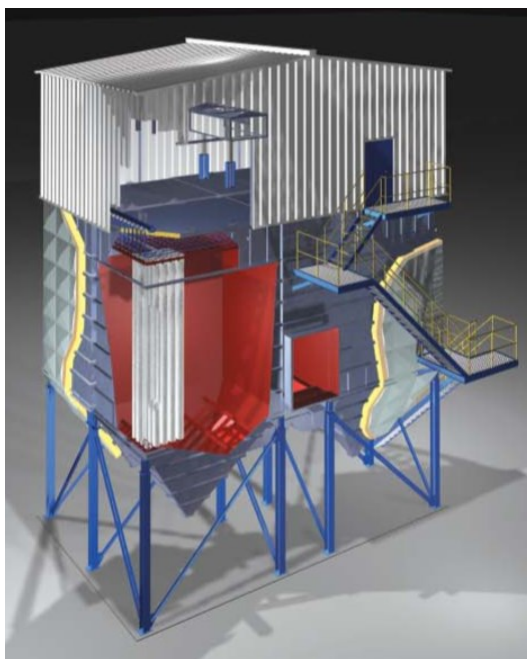


Jednotlivé složky jsou aktivovány v závislosti na jejich kyselosti následovně:



Textilní filtr

Rukávcový katalytický filtr kombinuje dvě metody čištění, povrchovou filtraci a katalýzu. Zařízení je schopno eliminovat emise dioxinů a furanů na úroveň hluboko pod platnými emisními limity při zachování ekonomické efektivity a s minimálními nároky na údržbu. Funkčním prvkem katalytického filtru jsou rukávce, vyrobené z membrány GORE-TEX – expandovaný polytetrafluorethylen (ePTFE), nalamínovaný na plstěný katalytický substrát. Membrána GORE-TEX zachycuje jemné částice na povrchu filtračních rukávců. Plynné složky procházejí membránou do katalytické vrstvy, kde jsou případně obsažené molekuly dioxinů (PCDD) a furanů (PCDF) konvertovány na CO_2 , H_2O a HCl .



Obrázek 18 Látkový filtr ZVVZ-Enven [22]

Textilní rukávcový filtr se skládá z několika komor s vertikálně uspořádanými rukávci kruhového průřezu. Konstrukce filtru je koncipována jako komorová, z plynotěsných svařovaných plechů, které jsou vyztuženy ocelovými profily. Komorová koncepce filtru umožňuje provádět servisní práce i za provozu zařízení odstavením příslušné komory při

zachování provozu ostatních komor na nominálním výkonu po dobu provádění servisní činnosti. Ve spodní části jsou pak instalovány výsypky odloučených tuhých částic.

Za provozu je kontinuálně monitorována tlaková ztráta filtru. Po překročení stanovené meze, případně po překročení daného časového intervalu je prováděna regenerace filtračních elementů pulzy tlakového vzduchu. Pulzy tlakového vzduchu způsobují krátkodobou expanzi rukávců a odpadnutí filtračního koláče, který je následně shromažďován ve výsypkách ve spodní části filtru a odtud evakuován mechanickou dopravou do sila.



Obrázek 19 – Tkaninový filtr firmy Donaldson [23]

Spalinový ventilátor

Spalinový ventilátor je dimenzován k pokrytí tlakové ztráty celého systému čištění spalin a udržování podtlaku v celém systému spalovací technologie.

Komín

Slouží k odvodu vyčištěných spalin do ovzduší a jsou v něm umístěny měřicí sondy, které zajišťují kontrolu spalování a kvality emisí s příslušnou registrací a zpracováním naměřených veličin podle zákona.

6. METODIKA NÁVRHU TERMICKÉHO BLOKU LINKY PRO SPALOVÁNÍ NEBEZPEČNÝCH ODPADŮ

Hlavní požadavek na moderní spalovny nebezpečných odpadů je vznik finálních oxidačních produktů z hořlavých složek obsažených ve spalovaném odpadu, spolu s podmínkou minimálního nedopalu. Legislativní hlediska s ohledem na vedení spalovacího procesu moderních spaloven nebezpečných odpadů a přípustných koncentrací škodlivin představuje v oblasti návrhu technologické linky splnění následujících podmínek:

1. vznik finálních oxidačních produktů z hořlavých složek obsažených ve spalovaném odpadu při minimálním nedopalu
2. minimální teplota spalin za posledním přívodem spalovacího vzduchu je 850°C, případně 1100°C v případech, kdy je spalován nebezpečný odpad s obsahem chloru nad 1% hmotnostní složky odpadu
3. doba zdržení spalin v rámci předepsané teploty v trvání minimálně dvou sekund
4. maximální hmotnost nespáleného uhlíku v tuhých zbytcích nesmí překročit 3%

V případě zneškodňování nebezpečných odpadů byla zachována koncepce dvou spalovacích fází, které zaručují dokonalé vyhoření všech spalitelných složek.

V rámci technického návrhu vlastní rotační pece je metodika návrhu rozdělena do několika fází:

1. Definice procesu

K definici procesu patří analýza všech vstupních informací a specifikací požadované tepelně-chemické reakce k dosažení sterilizace, vyhoření organických složek nebo materiálové přeměny odpadu. Do definice procesu se začleňuje množství ostatních vstupů související s návrhem dalšího zařízení navazujícího na požadované procesy ve spalovacím zařízení.

2. Tepelná a chemická analýza odpadu

Před vlastním návrhem pece se odpad podrobuje tepelně-chemické analýze. Tímto je možné určit chování odpadu uvnitř rotační komory s ohledem na jeho tavení, vypařování nebo dokonce zjištění jeho explodujícího charakteru. Analýzou je možné určit procento vlhkosti, objemovou hmotnost, tepelnou vodivost, chemické složení, přibližnou hodnotu měrné tepelné kapacity.

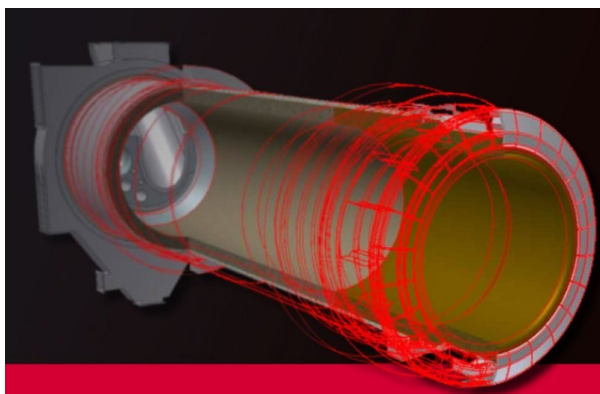
Velký význam v procesu návrhu pece se přikládá přenosu tepla materiálu. Schopnost materiálu přenášet teplo bude mít přímou souvislost s tím, jak se bude materiál chovat uvnitř rotační komory. V této souvislosti může materiál snadno přenášet teplo a toto teplo dále distribuovat nebo teplo naopak zadržovat.

Součástí tepelné analýzy je tepelná gravimetrická/vážková analýza, která určuje změny v hmotnosti materiálu jako funkci rozpětí teplot, při kterých dochází ke ztrátě hmotnosti. Výsledkem této analýzy je určení požadovaného teplotního profilu pece a určení toho, na jaké specifické teplotě reakce začíná a končí. Tímto se stanoví potřebná doba zdržení odpadu nebo požadovaného nárůstu teploty pro dokončení tepelné reakce.

Dostatek informací o chemickém složení je důležitý k pochopení chemických interakcí s jinými materiály za určitých teplot a to co, těmito reakcemi vzniká ve formě spalin na výstupu z rotační pece. Různé druhy spalin vyžadují odlišný přístup ve zpracování v technologickém procesu čištění spalin.

3. Dimenzování velikosti

Po důkladné tepelné a chemické analýze vstupního odpadu dochází k návrhu rozměrů rotační pece. Návrh velikosti pece nesouvisí pouze s její kapacitou, ale souvisí také s množstvím generovaného nebo potřebného tepla uvnitř komory produkovaného vypařováním odpadu. Délka a průměr spalovací komory jsou určeny na základě maximálního dávkovanému poměru, požadované doby zdržení a analýzy ložového profilu rotační pece tj. množstvím „náplně“ v rotační komoře.



Obrázek 20 – Ilustrační obrázek dimenzování rotační pece [24]

4. Porovnání přímého a nepřímého spalování

Volba návrhu přímého nebo nepřímého spalování souvisí v odlišnosti zavedení potřebného tepla do rotační komory. Přímé spalování umožňuje zavedení tepla přímo do vnitřního prostoru pece prostřednictvím toků horkých plynů, které způsobují intenzivní

přenos mezi tímto teplem a spalovaným odpadem. Nevýhodou tohoto řešení je vznik většího množství spalin, které je nutné dále zpracovávat než u nepřímého spalování odpadu.

U nepřímého spalování prochází potřebné teplo k uskutečnění reakce přes plášť rotační komory a k tepelnému přenosu dochází prostřednictvím kontaktu odpadu a pláště pece. Výhodou tohoto řešení je schopnost kontrolovat teplotu rotační komory po celé její délce a je vhodné pro odpady, u kterých je nutné dosáhnout předepsané teploty a její udržení na požadované hodnotě po jistý časový interval. Oproti přímému spalování vzniká méně spalin pro jejich další zpracování.

5. Návrh vyzdívky rotační komory

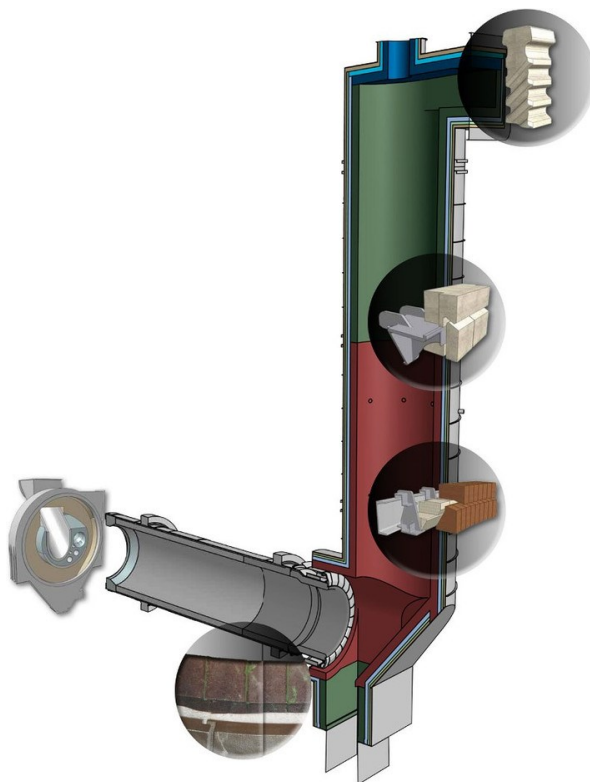
Úkolem žáruvzdorné vyzdívky je ochrana pláště rotační komory od vysokých teplot a abrazivních účinků spalovaného odpadu a je kritickou součástí spalovací komory. Požadavek na kvalitu vyzdívky a její návrh souvisí hlavně na vnitřní teplotě, chemickém složení odpadu a jeho abrazivitě.

V současné době je možné volit žáruvzdornou vyzdívku ve variantě lité nebo vyzdžené, která vyžaduje delší čas montáže než vyzdívka litá. Kvalita cihelné vyzdívky je měřena dle obsahu oxidu hlinitého, který má významný vliv na její trvanlivost co se týká teplotní odolnosti a pevnosti. Mezi hlavní výhody patří její vysoká odolnost vůči abrazivním materiálům a dosažení obecně lepších vlastností v porovnání se stejným chemickým složením litých vyzdívek. Hlavní nevýhoda cihelné vyzdívky je komplikovaná výměna poškozených částí, protože jednotlivé tvárnice jsou drženy na svém místě tlakem jiné cihly. V případě výměny není možné vyměnit pouze jednu poškozenou cihlu, ale rovnou několik.

Litá vyzdívka se dováží v práškové formě a ve formě mokré směsi se vyzdívá na místě po instalaci kotvících šroubů, nejčastěji ve tvaru „Y“ na vnitřním obvodu rotační komory. Po instalaci dochází k vysušení vyzdívky. Mezi hlavní výhody patří rychlá oprava v případě její poškození, mezi hlavní nevýhody výrazně rozdíly v kvalitě a životnosti v případě špatné instalace.

Nejčastějším zdrojem selhání vyzdívky je děj, který se nazývá „cyklování“. Cyklování je ve zjednodušené formě zahřívání a ochlazování pece. Pokaždé, když je pec ohřívána, vyzdívka expanduje spolu s bubnem, když je pec ochlazována, dochází ke smršťování vyzdívky společně s komorou. V případech, kdy je pec nepřetržitě ohřívána a

ochlazována může docházet ke tvorbě trhlin. Stejný případ pro tvorbu trhlin platí pro příliš rychlé ohřívání a ochlazování pece.



Obrázek 21 – Ilustrační obrázek návrh vyzdívky pro jednotlivé části spalovacího zařízení [24]

Dalším, častým zdrojem selhání výsypek je jejich chemická nekompatibilita, kdy materiál vyzdívky nemusí odolávat určitým chemikáliím. Mezi hlavními viníky poškození a opotřebení je chlór, který velice agresivně napadá vyzdívku kvůli jeho přirozené korozivní povaze. Další poškození způsobují neznámé chemické sloučeniny, které se mohou v odpadu vyskytovat.

Nejjednodušší způsob pro udržení požadované životnosti rotační pece je její pravidelná kontrola formou měření bodových teplot na obvodu pláště rotační komory. V případě, kdy je na povrchu rotační komory zjištěna teplotní difference mezi naměřenými hodnotami teplot měřená na jednotlivých úsecích pláště, může tato difference indikovat vadu.

6. Narušitelé lože rotačních komor

Ke zlepšení tepelného přenosu kondukci v rotačních pecích využívající nepřímého spalování mohou sloužit narušitelé lože, které pomáhají mísit materiálové lože, obracet odpad nebo eliminovat „mrtvé“ místa způsobující nedostatečné vyhoření odpadu.

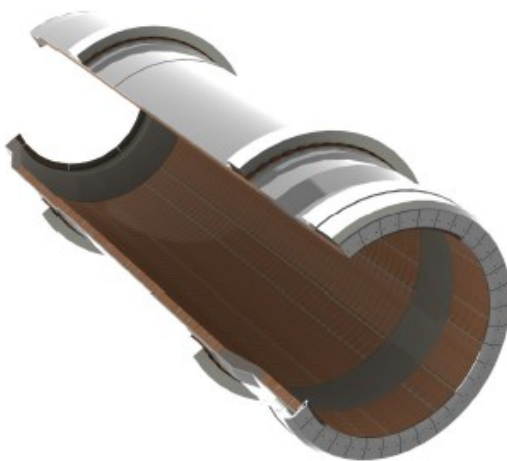
Narušitelé lože mají obvykle tvar výstupku po celé délce pece a periodickým průchodem odpadu přes tento výběžek dochází k jeho převalování.

7. NÁVRH SPALOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

7.1 Popis návrhu spalovacího zařízení

Navržená technologie pro spalování nebezpečných odpadů musí zpracovat zadané množství pevných, pastovitých a kapalných odpadů. Pevný odpad je dávkován do násypky pístového podavače v čele rotační pece, kdy je pístovým podavačem zatlačen do rotační pece. Pastovitý odpad je skladován v uzavřených nádobách a je dávkován do násypky spolu s pevným odpadem. Kapalný odpad je čerpán ze skladovacích nádrží do rozprašovací trysky pomocného hořáku.

Sklon rotační pece je konstantní a její uspořádání je v souproutém režimu, tedy tok spalovaného odpadu a vznikající spaliny mají stejný směr. Vlastní rotační pec je umístěna na odvalovacích kladkách umožňující otáčení kolem horizontální osy, regulace otáček je zabezpečováno změnou otáček pohonné jednotky. Pec tvoří ocelový plášť a z vnitřní strany je vyzděna žáruvzdornou a izolační vyzdívkou odolávající vysokým teplotám, chemickým účinkům a mechanickému namáhání. Součástí pláště rotační komory je tepelná izolace zajišťující bezpečnou teplotu pláště pece s ohledem na okolní pracovní prostředí.

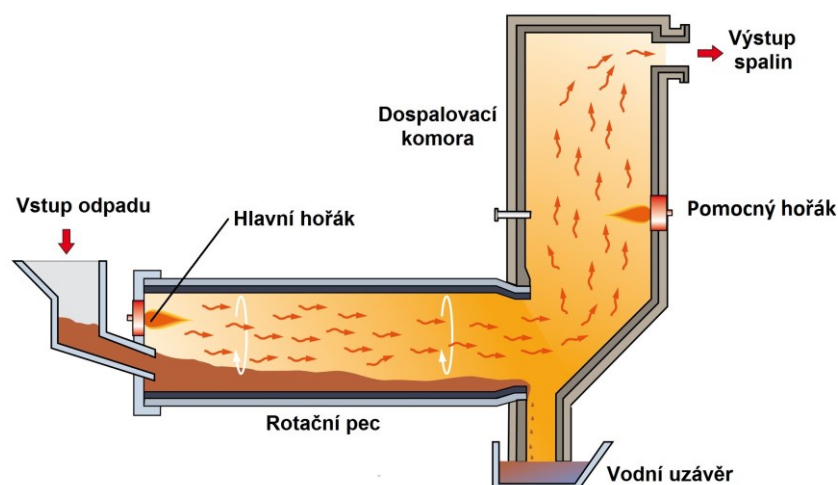


Obrázek 22 - Ilustrativní obrázek 3D modelu rotační pece [25]

Na čelní straně pece je umístěn hlavní hořák na zemní plyn s přívodem předehřátého spalovacího vzduchu s hlídačem plamene, který automaticky zajišťuje skrz regulaci spalovacího procesu uzavření přívodu paliva v případech, kdy dojde ke ztrátě plamene hořáku. Součástí čelní strany rotační pece je pomocný zapalovací hořák integrovaný do hlavního hořáku a rozprašovací tryska pro dávkování kapalného odpadu. V prvním stupni

spalovacího procesu je odpad postupně vysušen, dojde k uvolnění prchavé hořlaviny a po zahřátí odpadu na zápalnou teplotu dochází k hoření odpadu a jeho dohoření. Vyhořelý odpad v podobě škváry nebo popela vypadává do vodního uzávěru. Rotační pec je provozována v podtlakovém režimu, zajišťující zamezení úniku spalin do pracovního prostoru kotleny. Z dohořivací komory odchází spaliny do kotle na odpadní teplo. Tuhý a nespalitelný zbytek se odvádí z výsypky dohořivací komory do odstruskovacího zařízení.

Primární spalovací vzduch je nasáván z prostor manipulace s odpadem a je do rotační pece dopravován vzduchovým ventilátorem.



Obrázek 23 - Schéma návrhu spalovacího zařízení [26]

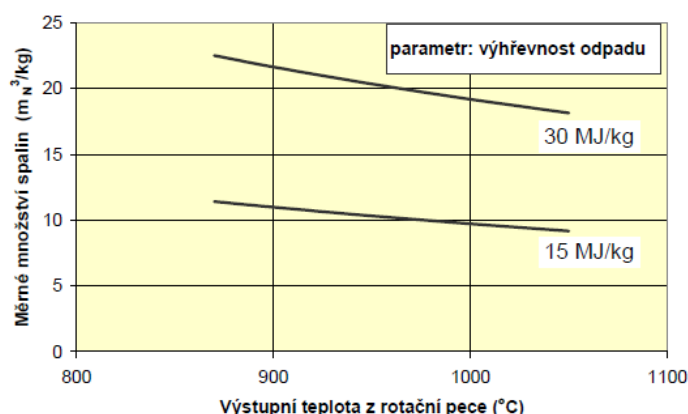
7.2 Spalovací režim v rotační peci

Spalovací procesy v rotační peci popisují rovnice hmotnostních a tepelných bilancí a vyjadřují spalování hořlavých složek odpadu pomocí spalovacího média, kterým je ohřátý nebo neohřátý vzduch. Rovnice tepelné bilance musí zahrnovat činnost pomocného hořáku spalujícího přídavné palivo z důvodu stabilizace spalovacího režimu v případech fluktuace výhřevnosti odpadu. Ztráty v podobě vysálaného tepla do okolí rotační pece nepředstavují v rovnici tepelné bilance podstatnou roli, využívají se pouze pro určení celkového vysálaného tepla a jejich působení na pracovní prostředí nebo při výpočtu povrchové teploty rotační pece.

Spaliny vystupující z rotační komory jsou přivedeny do dohořivací komory tvaru ocelového válce, tvořenou žáruvzdornou vyzdívkou a izolační vrstvou. V dolním prostoru dohořivací komory je umístěn přídavný hořák na zemní plyn zajišťující udržování požadované teploty spalin na požadovanou teplotu na výstupu z dohořivací komory.

Zapalování hořáku je zabezpečováno stejně jako v rotační komoře zapalovacím hořákem vybavený hlídačem plamene.

Závislost mezi měrným objemem spalin a jejich teplotou na výstupu z rotační pece v závislosti na výhřevnosti zpracovávaného odpadu zobrazuje následující obrázek. Obrázek ilustruje skutečnost, že měrný objem vytvářených spalin je závislý na teplotě, při které je odpad spalován a vlastní výhřevnosti spalovaného odpadu. Zvýšením výhřevnosti na dvojnásobek původní hodnoty v rámci stálé teploty spalování v rozpětí 850 – 1100°C znamená prakticky zvýšení měrného objemu spalin na dvojnásobné množství.



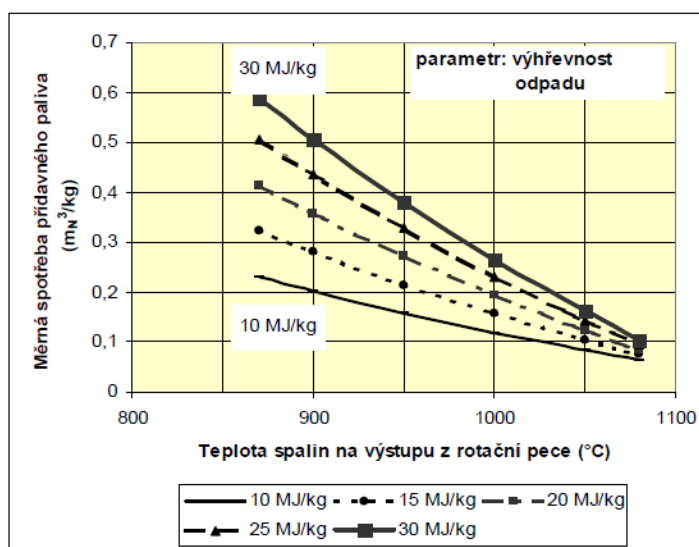
Obrázek 24 - Závislost mezi výstupní teplotou spalin z rotační pece a množstvím produkovaných spalin na výhřevnosti odpadu [27]

Důvodem zvýšeného měrného objemu spalin u nižších teplot souvisí s vyšším přívodem spalovacího vzduchu, jímž se reguluje spalovací teplota uvnitř rotační komory při spalování vysoko výhřevných odpadů. Spalování nízko výhřevných paliv sebou přináší požadavek na dodání přídavného tepla hlavním hořákem nebo spalováním vyššího podílu kapalných odpadů s vyšší výhřevností.

Významným faktorem pro volbu spalovací teploty je rovněž tvorba nálepů na vnitřní straně spalovací komory, které mohou být natolik závažné, že mohou vést k odstavení technologické linky z provozu. Intenzita tvorby nálepů úzce souvisí s charakterem vstupního odpadu a složením nespalitelných látek s nízkou teplotou tání popelovin. Vhodným řešením pro zamezení vzniku nálepů je taková volba spalovací teploty, která umožňuje vytváření taveniny nespalitelných zbytků s trvalým výtokem z rotační komory do vodního uzávěru tzv. „slagging“ neboli tavném režimu. Teplota, odpovídající tomuto režimu je závislá na složení vstupního odpadu, nicméně obecným rozhraním je teplota 1000°C.

Volba vyšší teploty spalování v rotační peci s nižším přívodem spalovacího vzduchu a tedy nižším měrným objemem vytvářených spalin má pozitivní vliv i na spotřebu

přídavného paliva pomocného hořáku. Následující obrázek dokazuje, že množství přídavného paliva klesá s rostoucí teplotou na výstupu z dohořivací komory a zvyšuje se s rostoucí výhřevností odpadu.



Obrázek 25 - Závislost spotřeby zemního plynu pro dosažení 1100°C v dohořivací komoře na výstupní teplotě z rotační pece a výhřevnosti odpadu [27]

7.3 Volba spalovacího režimu v rotační peci

Z předchozího textu je zřejmé, že vhodnou volbou pro spalovací režim v rotační peci je vedení spalovacího procesu v tavném režimu, který má pozitivní vliv nejen na spotřebu přídavného paliva pomocného hořáku, ale i na tvorbu nálepů a množství generovaných spalín. Z tohoto důvodu volím spalovací teplotu v rotační komoře na úrovni 1100°C s tím, že výkon pomocného hořáku je dimenzován pouze na pokrytí ztrát ve formě vysálaného tepla pláštěm rotační pece a dohořivací komory a pokrytí tepelných ztrát ve formě nedopalu z rotační pece a dohořivací komory .

Návrh dohořivací komory a výkon pomocného hořáku umožňuje dodržet zákonem stanovenou dostatečnou dobu setrvání a požadovanou minimální teplotu 1100°C (nad posledním přívodem vzduchu) pro odpady s obsahem chloru nad 1% hmotnostní složky odpadu. Tím je zaručeno, že veškeré spalitelné složky budou rozloženy na jednoduché anorganické sloučeniny.

8. ODVOZENÍ ZÁKLADNÍCH SPALOVACÍCH A TEPELNÝCH VÝPOČTŮ

1. Celková výhřevnost odpadu

$$Q_o = \frac{\sum m_i \cdot Q_i}{\sum m_i} [MJ / kg] \quad (2)$$

Q_i výhřevnost i-té složky odpadu

2. Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu a množství spalin z odpadu pro vstupní pevný a kapalný odpad

a) Teoretická spotřeba spalovacího vzduchu

$$V'_{vz, s, o} = K_1 \cdot \frac{Q_o}{4186,7} + K_2 [m_N^3 / kg] \quad (3)$$

K_1, K_2 konstanty pro Rossinovy – Freslingovy vzorce [28]

b) Teoretický objem suchých spalin

$$V'_{sp, s, o} = K_3 \cdot \frac{Q_o}{4186,7} + K_4 [m_N^3 / kg] \quad (4)$$

K_3, K_4 konstanty pro Rossinovy – Freslingovy vzorce [28]

c) Teoretická spotřeba vlhkého spalovacího vzduchu při spalování vstupního odpadu pro zvolený součinitel zvětšení objemu vlhkosti vzduchu

$$V'_{vz, v, o} = V'_{vz, s, o} \cdot \nu [m_N^3 / kg] \quad (5)$$

d) Teoretické množství vlhkých spalin pro zvolený součinitel zvětšení objemu vlhkosti vzduchu

$$V'_{sp, v, o} = V'_{sp, s, o} + V_w^o [m_N^3 / kg] \quad (6)$$

$$V_w^o = 11,1 \cdot H + 1,2 \cdot W + \frac{(\nu - 1)}{\nu} \cdot V'_{vz, v, o} \left[m_N^3 / kg \right] \quad (7)$$

e) Celkové množství vlhkých spalín pro zvolený přebytek vzduchu

$$V_{sp, v, o, c} = V'_{sp, v, o} + (n - 1) \cdot V'_{vz, v, o} \left[m_N^3 / kg \right] \quad (8)$$

f) Množství spalín ze spalovaného odpadu při hodinovém výkonu

$$V_{sp, o} = V_{sp, v, o, c} \cdot m_o \left[m_N^3 / h \right] \quad (9)$$

3. Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu a množství spalín pro zemní plyn

a) Teoretická spotřeba suchého spalovacího vzduchu

$$V'_{vz, s, zp} = K_1 \cdot \frac{Q_{zp}}{4186,7} + K_2 \left[m_N^3 / m_N^3 \right] \quad (10)$$

b) Množství skutečného vzduchu suchého pro zvolený přebytek vzduchu

$$V_{vz, s, zp} = V'_{vz, s, zp} \cdot n \left[m_N^3 / m_N^3 \right] \quad (11)$$

c) Množství skutečného vzduchu vlhkého pro zvolený součinitel zvětšení objemu vlhkosti vzduchu

$$V_{vz, v, zp} = V'_{vz, s, zp} \cdot \nu \left[m_N^3 / m_N^3 \right] \quad (12)$$

d) Teoretický objem vzniklých suchých spalín

$$V'_{sp, s, zp} = K_3 \cdot \frac{Q_{zp}}{4186,7} + K_4 \left[m_N^3 / m_N^3 \right] \quad (13)$$

e) Množství vzniklých spalín skutečných suchých pro zvolený přebytek vzduchu

$$V_{sp, s, zp} = V'_{sp, s, zp} + (n - 1) \cdot V'_{vz, s, zp} \left[m_N^3 / m_N^3 \right] \quad (14)$$

f) Celkové množství vzniklých spalín skutečných vlhkých

$$V_{sp, v, zp, c} = V_{sp, s, zp} + V_w^{zp} \left[m_N^3 / m_N^3 \right] \quad (15)$$

$$V_w^{zp} = 0,38 + 0,0179 \cdot Q_{zp} \left[m_N^3 / m_N^3 \right] \quad (16)$$

4. Průtok plynu hlavním a pomocným hořákem pro udržení teoretické teploty spalin v počátečním úseku rotační komory

Pozn. Aby zbytečně teplota spalin nezatěžovala vyzdívku rotační komory s ohledem na její vlastnosti je žádoucí, aby teoretická teplota spalin nepřesáhla teplotu $t_{st} = 1200^\circ C$. Teplo přivedené spalovacím vzduchem je zanedbatelné a ve výpočtu se neuvažuje.

a) Tepelná bilance počátečního úseku rotační komory

Teplo přivedené odpadem (pevný a kapalný odpad)

$$Q_1 = Q_o \cdot m_o \text{ [kW]} \quad (17)$$

Teplo přivedené zemním plynem hlavním hořákem

$$Q_2 = Q_{zp} \cdot V_{zp} \text{ [kW]} \quad (18)$$

Teplo odvedené spalinami

$$Q_3 = (V_{sp, v, o, c} \cdot m_o + V_{sp, v, zp, c} \cdot V_{zp}) \cdot c_s \cdot t_{st} \text{ [kW]} \quad (19)$$

$$c_s = 2,147 \cdot 10^{-4} \cdot t_{st} + 1,46 \text{ [kJ / m}_N^3 \cdot K] \quad (20)$$

b) Sestavení bilanční rovnice

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \text{ [kW]} \quad (21)$$

$$Q_o \cdot m_o + Q_{zp} \cdot V_{zp} = (V_{sp, v, o, c} \cdot m_o + V_{sp, v, zp, c} \cdot V_{zp}) \cdot c_s \cdot t_{st} \quad (22)$$

Odpovídající tepelný výkon hlavního hořáku na zemní plyn pro udržení teoretické teploty spalin $t_{st} = 1200^\circ C$ v počátečním úseku rotační komory

$$P_{1zp} = \frac{V_{zp} \cdot Q_{zp}}{3600} \text{ [kW]} \quad (23)$$

- c) Úpravou bilanční rovnice pro $V_{zp} = 0$, lze získat skutečný přebytek vzduchu v rotační komoře

$$n_{1,vz} = 1 + \frac{Q_o - (V'_{sp,v,o} \cdot c_s \cdot t_{st})}{V'_{vz,v,o} \cdot c_s \cdot t_{st}} [-] \quad (24)$$

5. Teplota spalin na výstupu z rotační pece

- a) Tepelná bilance mezi vstupem a výstupem z rotační komory

Teplo přivedené odpadem

$$Q_1 = Q_o \cdot m_o [kW] \quad (25)$$

Teplo přivedené zemním plynem hlavního hořáku

$$Q_2 = Q_{zp} \cdot V_{zp} [kW] \quad (26)$$

Teplo odvedené spalinami

$$Q_3 = (V_{sp,v,o,c} \cdot m_o + V_{sp,v,zp,c} \cdot V_{zp}) \cdot c_s \cdot t_{s1} [kW] \quad (27)$$

Teplo odvedené pláštěm rotační pece

$$Q_4 = 0,14 \cdot (Q_o \cdot m_o + Q_{zp} \cdot V_{zp}) [kW] \quad (28)$$

Teplo odvedené tuhými zbytky

$$Q_5 = K \cdot m_o \cdot c_o \cdot t_{s1} [kW] \quad (29)$$

- b) Sestavení bilanční rovnice

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5 [kW] \quad (30)$$

Po úpravě a dosazení vztah pro teplotu spalin

$$t_{s1} = \frac{0,86 \cdot (Q_o \cdot m_o + Q_{zp} \cdot V_{zp})}{K \cdot m_o \cdot c_o + V_{sp,v,o,c} \cdot m_o + V_{sp,v,zp,c} \cdot V_{zp} \cdot c_s} [^{\circ}C] \quad (31)$$

6. Průtok plynu pomocným hořákem pro udržení minimální teploty spalin v dohořivací komoře

Pro dokonalé vyhoření plynných produktů spalování a pevných částic unášených spalinami je nutné dosáhnout v komoře optimální teplotu spalin $t_{s,opt} = 1100^{\circ}\text{C}$.

a) Tepelná bilance dohořivací komory

Teplo přivedené odpadem z rotační pece za 1s

$$Q_{1,DK} = Q_o \cdot m_o + Q_{zp} \cdot V_{zp} - 0,14 \cdot (Q_o \cdot m_o + Q_{zp} \cdot V_{zp}) - K \cdot m_o \cdot c_o \cdot t_{s1} \quad [\text{kW}] \quad (32)$$

Teplo přivedené zemním plynem pomocného hořáku za 1s

$$Q_{2,DK} = Q_{zp} \cdot V_{zp2} \quad [\text{kW}] \quad (33)$$

Ztráty dohořivací komory

$$z = 0,05 \quad [-]$$

Teplo odvedené spalinami za 1s

$$Q_{3,DK} = (V_{sp,v,o,c} \cdot m_o + V_{sp,v,zp,c} \cdot (V_{zp} + V_{zp2})) \cdot c_s \cdot t_{s2} \quad [\text{kW}] \quad (34)$$

Teplo odvedené tuhými zbytky

$$Q_{4,DK} = K \cdot m_o \cdot c_o \cdot t_{s2} \quad [\text{kW}] \quad (35)$$

b) Sestavení bilanční rovnice

$$(1-z) \cdot Q_{1,DK} + Q_{2,DK} = Q_{3,DK} + Q_{4,DK} \quad [\text{kW}] \quad (36)$$

Po úpravě a dosazení vztah pro objemový průtok zemního plynu pomocným hořákem

$$V_{zp2} = \frac{t_{s,opt} \cdot (c_s \cdot (V_{sp,v,o,c} \cdot m_o + V_{sp,v,zp,c} \cdot V_{zp1}) + K \cdot m_o \cdot c_o) - (1-z) \cdot 0,86 \cdot (Q_o \cdot m_o + Q_{zp} \cdot V_{zp})}{(1-z) \cdot Q_{zp} - V_{sp,v,zp,c} \cdot t_{s,opt} \cdot c_s} \quad [\text{m}^3 / \text{s}] \quad (37)$$

Odpovídající tepelný výkon pomocného hořáku

$$P_{2zp} = V_{zp2} \cdot Q_{zp} [kW] \quad (38)$$

c) Teplota spalin na výstupu z dohořivací komory

$$t_{s2} = \frac{(1-z) \cdot (0,86 \cdot (Q_o \cdot m_o + Q_{zp} \cdot V_{zp}) + V_{zp2} \cdot Q_{zp})}{c_s \cdot (V_{sp,v,o,c} \cdot m_o) + V_{sp,v,zp,c} \cdot (V_{zp} + V_{zp2}) + K \cdot m_o \cdot c_o} [^{\circ}C] \quad (39)$$

7. Průtok spalin za dohořivací komorou

a) Normální stav

$$V_{sN} = V_{sp,v,o,c} \cdot \frac{m_o}{3600} + (V_{zp} + V_{zp2}) \cdot V_{sp,v,zp,c} [m^3_N / s] \quad (40)$$

b) Skutečný stav při teplotě spalin t_{s2}

$$V_s = V_{sN} \cdot \frac{t_{s2} + 273,15}{273,15} [m^3 / s] \quad (41)$$

8) Průtok spalovacího vzduchu

a) Primární spalovací vzduch do rotační pece

Normální stav

$$V_{VN1} = V'_{vz,v,o} \cdot n_{1,vz} \cdot \frac{m_o}{3600} [m^3_N / s] \quad (42)$$

Skutečný stav při teplotě vzduchu t_{vz1}

$$V_{V1} = V_{VN1} \cdot \frac{t_{vz1} + 273,15}{273,15} [m^3 / s] \quad (43)$$

b) Sekundární spalovací vzduch do dohořivací komory, za podmínky konstantního přebytku vzduchu $n_{2,vz}$

Normální stav

$$V_{VN2} = V_{VN1} \cdot (n_{2,vz} - n_{1,vz}) [m^3_N / s] \quad (44)$$

Skutečný stav při teplotě vzduchu t_{vz2}

$$V_{v2} = V_{vN2} \cdot \frac{t_{vz2} + 273,15}{273,15} [m^3 / s] \quad (45)$$

8.1 Výpočet základních spalovacích rovnic

1. Základní parametry rotační spalovny

Jmenovitý výkon spalovacího zařízení	1000 kg / h
Výhřevnost pevného odpadu	17 MJ / kg
Výhřevnost kapalného odpadu	33 MJ / kg
Obsah vody v odpadu	0 – 20% (zvoleno 15%)
Obsah vodíku v odpadu	0 – 13% (zvoleno 8%)

2. Celková výhřevnost pevného a kapalného odpadu

Výpočet vychází z předpokladu, že pevné odpady spolu s kapalným odpadem jsou do rotační komory dávkovány kontinuálně v poměru 90% pevného odpadu a 10% kapalného odpadu.

$$Q_o = \frac{\sum m_i \cdot Q_i}{\sum m_i} = \frac{900 \cdot 17 + 100 \cdot 33}{1000} = 18,65 \text{ MJ / kg} \quad (46)$$

Q_i výhřevnost i-té složky odpadu

m_i hmotnost i-té složky odpadu

Není-li známo složení paliva, lze teoretickou spotřebu spalovacího vzduchu a teoretický objem suchých spalín určit přibližně jako funkci výhřevnosti paliva Q_i (kJ / kg), dle empirických vztahů. V následujících výpočtech jsou uvažovány vztahy podle Rosina – Freslinga.

Teoretická spotřeba spalovacího vzduchu

$$V'_{vz, s, o} = K_1 \cdot \frac{Q_i}{4186,7} + K_2 [m^3 / kg], \text{ případně } [m^3 / m^3] \quad (47)$$

K_1, K_2 konstanty pro Rossinovy – Freslingovy vzorce [28]

Teoretický objem suchých spalín

$$V'_{sp, s, o} = K_3 \cdot \frac{Q_i}{4186,7} + K_4 [m^3 / kg], \text{ případně } [m^3 / m^3] \quad (48)$$

K_3, K_4 konstanty pro Rossinovy – Freslingovy vzorce [28]

Tabulka 5 - Hodnoty konstant pro Rossinovy – Freslingovy vzorce [28]

Paliva	K_1 $(m^3 \cdot kg^{-1} (kJ \cdot kg^{-1})^{-1})$	$K_2 (m^3 \cdot kg^{-1})$	K_3 $(m^3 \cdot kg^{-1} (kJ \cdot kg^{-1})^{-1})$	$K_4 (m^3 \cdot kg^{-1})$
Tuhá	1,012	0,5	0,95	1,375
Kapalná	0,85	2,0	1,11	0
Plynná	$(m^3 \cdot m^{-3} (kJ \cdot m^{-3})^{-1})$	$(m^3 \cdot m^{-3})$	$(m^3 \cdot m^{-3} (kJ \cdot m^{-3})^{-1})$	$(m^3 \cdot m^{-3})$
Nízkovýhřevná $(Q_i < 12,6 MJ / m^3)$	0,92	-0,08	0,76	0,87
Vysokovýhřevná $(Q_i > 12,6 MJ / m^3)$	1,07	0	1,09	0,47

3. Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu a množství spalín pro vstupní pevný a kapalný odpad.

Konstanty v jednotlivých výpočtech modifikovány s ohledem celkovém složení odpadu (podíl pevné a kapalné složky odpadu).

a) Teoretická spotřeba spalovacího vzduchu

$$V'_{vz,s,o} = 0,9958 \cdot \frac{Q_o}{4186,7} + 0,65 = 0,9958 \cdot \frac{18650}{4186,7} + 0,65 = 5,09 \text{ m}_N^3 / \text{kg} \quad (49)$$

b) Teoretický objem suchých spalín

$$V'_{sp,s,o} = 0,966 \cdot \frac{Q_o}{4186,7} + 1,2375 = 0,966 \cdot \frac{18650}{4186,7} + 1,2375 = 5,54 \text{ m}_N^3 / \text{kg} \quad (50)$$

c) Teoretická spotřeba vlhkého spalovacího vzduchu při spalování vstupního odpadu pro zvolený součinitel zvětšení objemu vlhkosti vzduchu $\nu = 1,04$

$$V'_{vz,v,o} = V'_{vz,s,o} \cdot \nu = 5,09 \cdot 1,04 = 5,29 \text{ m}_N^3 / \text{kg} \quad (51)$$

d) Teoretické množství vlhkých spalín pro zvolený součinitel zvětšení objemu vlhkosti vzduchu $\nu = 1,04$

$$V'_{sp,v,o} = V'_{sp,s,o} + V'_w = 5,54 + 1,27 = 6,81 \text{ [m}_N^3 / \text{kg]} \quad (52)$$

$$V'_w = 11,1 \cdot H + 1,2 \cdot W + \frac{(\nu - 1)}{\nu} \cdot V'_{vz,v,o} = 11,1 \cdot 0,08 + 1,2 \cdot 0,15 + \frac{(1,04 - 1)}{1,04} \cdot 5,29 = 1,27 \text{ m}_N^3 / \text{kg} \quad (53)$$

W procentuální podíl vodní složky v celkovém odpadu, volím $W = 15\%$

H procentuální podíl obsahu vodíku, volím $H = 8\%$

e) Celkové množství vlhkých spalín pro zvolený přebytek vzduchu $n = 2$

$$V_{sp,v,o,c} = V'_{sp,v,o} + (n - 1) \cdot V'_{vz,v,o} = 6,81 + (2 - 1) \cdot 5,29 = 12,1 \text{ m}_N^3 / \text{kg} \quad (54)$$

f) Množství spalín z odpadu při výkonu $1000 \text{ kg} / \text{hod}$

$$V_{sp,o} = V_{sp,v,o,c} \cdot 1000 = 12,1 \cdot 1000 = 12100 \text{ m}_N^3 / \text{h} \dots \Rightarrow 3,36 \text{ m}_N^3 / \text{s} \quad (55)$$

4. Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu a množství spalín pro zemní plyn

Stejně jako u odpadu je pro výpočet teoretické spotřeby spalovacího vzduchu a teoretický objem suchých spalin zemního plynu využito empirických vztahů podle Rosina – Freslinga. Zvolená výhřevnost zemního plynu $Q_{zp} = 38000 \text{ [kJ/m}_N^3\text{]}$

a) Teoretická spotřeba suchého spalovacího vzduchu

$$V'_{vz, s, zp} = 1,07 \cdot \frac{Q_{zp}}{4186,7} + 0 = 1,07 \cdot \frac{38000}{4186,7} = 9,71 \text{ m}_N^3 / \text{m}_N^3 \quad (56)$$

b) Množství skutečného vzduchu suchého pro zvolený přebytek vzduchu $n = 1,05$

$$V_{vz, s, zp} = V'_{vz, s, zp} \cdot n = 9,71 \cdot 1,05 = 10,20 \text{ m}_N^3 / \text{m}_N^3 \quad (57)$$

c) Množství skutečného vzduchu vlhkého pro zvolený součinitel zvětšení objemu vlhkosti vzduchu $v = 1,04$

$$V_{vz, v, zp} = V'_{vz, s, zp} \cdot v = 10,20 \cdot 1,04 = 10,61 \text{ m}_N^3 / \text{m}_N^3 \quad (58)$$

d) Teoretický objem vzniklých suchých spalin

$$V'_{sp, s, zp} = 1,09 \cdot \frac{Q_{zp}}{4186,7} + 0,47 = 1,09 \cdot \frac{38000}{4186,7} + 0,47 = 10,36 \text{ m}_N^3 / \text{m}_N^3 \quad (59)$$

e) Množství vzniklých spalin skutečných suchých pro zvolený přebytek vzduchu $n = 1,05$

$$V_{sp, s, zp} = V'_{sp, s, zp} + (n - 1) \cdot V'_{vz, s, zp} = 10,36 + (1,05 - 1) \cdot 9,71 = 10,85 \text{ m}_N^3 / \text{m}_N^3 \quad (60)$$

f) Celkové množství vzniklých spalin skutečných vlhkých

$$V_{sp, v, zp, c} = V_{sp, s, zp} + V_w^{zp} = 10,85 + 1,06 = 11,91 \text{ m}_N^3 / \text{m}_N^3 \left[\text{m}_N^3 / \text{m}_N^3 \right] \quad (61)$$

$$V_w^{zp} = 0,38 + 0,0179 \cdot Q_{zp} = 0,38 + 0,0179 \cdot 38 = 1,06 \text{ m}_N^3 / \text{m}_N^3 \quad (62)$$

5. Určení minimálního a maximálního množství spalin v rotační komoře

Pro určení minimálního a maximálního množství spalin v rotační komoře, které jsou dány součtem spalin vznikajících ze spalování odpadu a zemního plynu volím plynový

hořák na zemní plyn značky Dunphy pro střední a vysoké výkony s následujícími parametry:

Typ hořáku	<i>TG 420YM</i>
Výkon hořáku	1250 – 6500 <i>kW</i>
Spotřeba zemního plynu	142 – 741 m_N^3 / hod
Maximální přetlak ve spalovací komoře	2500 <i>Pa</i>

a) Množství spalin zemního plynu pro minimální výkon hlavního hořáku

$$V_{zp, \min} = 142 \, m_N^3 / hod$$

$$V_{sp, zp, \min} = V_{sp, v, zp, c} \cdot V_{zp, \min} = 11,91 \cdot 142 = 1691 \, m_N^3 / hod \quad (63)$$

b) Množství spalin zemního plynu pro maximální výkon hlavního hořáku

$$V_{zp, \max} = 741 \, m_N^3 / hod$$

$$V_{sp, zp, \max} = V_{sp, v, zp, c} \cdot V_{zp, \max} = 11,91 \cdot 741 = 8825 \, m_N^3 / hod \quad (64)$$

c) Celkové množství spalin z odpadu a zemního plynu pro minimální výkon hlavního hořáku v rotační peci

$$V_{sp, RP, \min} = V_{sp, o} + V_{sp, zp, \min} = 12100 + 1691 = 13791 \, m_N^3 / hod \dots \Rightarrow 3,83 \, m_N^3 / s \quad (65)$$

d) Celkové množství spalin z odpadu a zemního plynu pro maximální výkon hlavního hořáku v rotační peci

$$V_{sp, RP, \max} = V_{sp, o} + V_{sp, zp, \max} = 12100 + 8825 = 20925 \, m_N^3 / hod \dots \Rightarrow 5,81 \, m_N^3 / s \quad (66)$$

e) Skutečné množství spalin v rotační peci při teplotě $t_{s1} = 1100^\circ C$ pro minimální výkon hořáku

$$V_{sp, RP, sk, \min} = \frac{t_{s1} + 273,15}{273,15} \cdot V_{sp, RP, \min} = \frac{1100 + 273,15}{273,15} \cdot 3,83 = 19,25 \, m^3 / s \quad (67)$$

- f) Skutečné množství spalin v rotační peci při teplotě $t_{s1} = 1100^{\circ}\text{C}$ pro maximální výkon hořáku

$$V_{sp, RP, sk, \max} = \frac{t_{s1} + 273,15}{273,15} \cdot V_{sp, RP, \max} = \frac{1100 + 273,15}{273,15} \cdot 5,81 = 28,44 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (68)$$

6. Určení minimálního a maximálního množství spalin v dohořivací komoře

Pro určení minimálního a maximálního množství spalin v dohořivací komoře, které jsou dány součtem spalin příchozích z rotační pece a spalin pomocného hořáku volím plynový hořák na zemní plyn značky Dunphy pro nižší výkony s následujícími parametry:

Typ hořáku	<i>TG 35ZHL</i>
Výkon hořáku	<i>475 – 2200 kW</i>
Spotřeba zemního plynu	<i>54,1 – 251 m_N³ / hod</i>
Maximální přetlak ve spalovací komoře	<i>2500 Pa</i>

- a) Množství spalin zemního plynu v dohořivací komoře pro minimální výkon pomocného hořáku $V_{zp, \min} = 54,1 \text{ m}_N^3 / \text{hod}$

$$V_{sp, zp, DK, \min} = V_{sp, v, zp, c} \cdot V_{zp, \min} = 11,91 \cdot 54,1 = 644 \text{ m}_N^3 / \text{hod} \quad (69)$$

- b) Množství spalin zemního plynu v dohořivací komoře pro maximální výkon pomocného hořáku $V_{zp, \max} = 251 \text{ m}_N^3 / \text{hod}$

$$V_{sp, zp, DK, \max} = V_{sp, v, zp, c} \cdot V_{zp, \max} = 11,91 \cdot 251 = 2989 \text{ m}_N^3 / \text{hod} \quad (70)$$

- c) Celkové množství spalin z odpadu a zemního plynu pro minimální výkon hlavního a pomocného hořáku

$$\begin{aligned} V_{sp, DK, \min} &= V_{sp, o} + V_{sp, zp, \min} + V_{sp, zp, DK, \min} = 12100 + 1691 + 644 = \\ &= 14435 \text{ m}_N^3 / \text{hod} \dots \Rightarrow 4,01 \text{ m}_N^3 / \text{s} \end{aligned} \quad (71)$$

- d) Celkové množství spalin z odpadu a zemního plynu pro maximální výkon hlavního a pomocného hořáku

$$\begin{aligned} V_{sp, DK, \max} &= V_{sp, o} + V_{sp, zp, \max} + V_{sp, zp, DK, \max} = 12100 + 8825 + 2989 = \\ &= 23914 \text{ m}_N^3 / \text{hod} \dots \Rightarrow 6,64 \text{ m}_N^3 / \text{s} \end{aligned} \quad (72)$$

7. Určení skutečného množství spalin v dohořivací komoře

- a) Skutečné množství spalin v dohořivací komoře při teplotě $t_{s2} = 1200^\circ\text{C}$ pro minimální výkon hořáků.

Důvodem volby vyšší teploty pro výpočet skutečného množství spalin než stanovených 1100°C na výstupu z dohořivací komory je, že v rámci reálného provozu spalovacího zařízení tato teplota může fluktuovat v závislosti na spalovaném odpadu mezi teplotami $1100 - 1200^\circ\text{C}$ s podmínkou, že nikdy nesmí poklesnout pod zákonem stanovenou teplotu 1100°C (odpady s obsahem chloru nad 1% hm.).

Pro výpočet byl využit vztah Gay-Lussacův vyjadřující závislost mezi teplotou a objemem plynu za stálého tlaku. [29]

$$V_{sp, DK, sk, \min} = \frac{t_{s2} + 273,15}{273,15} \cdot V_{sp, DK, \min} = \frac{1200 + 273,15}{273,15} \cdot 4,01 = 21,63 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (73)$$

- b) Skutečné množství spalin v dohořivací komoře při teplotě $t_{s2} = 1200^\circ\text{C}$ pro maximální výkon hořáků a požadované hodinové množství spalovaného odpadu

$$V_{sp, DK, sk, \max} = \frac{t_{s2} + 273,15}{273,15} \cdot V_{sp, DK, \max} = \frac{1200 + 273,15}{273,15} \cdot 6,64 = 35,81 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (74)$$

8. Určení doby setrvání spalin v dohořivací komoře

S ohledem na minimální stanovenou dobu zdržení spalin v dohořivací komoře volím průměr dohořivací komory d_{DK} a výšku dohořivací komory h_{DK} (mezi příívodem sekundárního vzduchu a výstupem spalin).

$$d_{DK} = 3700 \text{ mm}$$

$$h_{DK} = 6700 \text{ mm}$$

a) Objem dohořivací komory nad pomocným hořákem

$$V_{DK} = \frac{\pi \cdot d_{DK}^2}{4} \cdot h_{DK} = \frac{\pi \cdot 3,7^2}{4} \cdot 6,7 = 72,04 \text{ m}^3 \quad (75)$$

b) Doba setrvání spalin v dohořivací komoře pro minimální výkony hlavního a pomocného hořáku na zemní plyn

$$\tau_{DK} = \frac{V_{DK}}{V_{sp, DK, sk, \min}} = \frac{72,04}{21,63} = 3,33 \text{ s} \quad (76)$$

c) Doba setrvání spalin v dohořivací komoře pro maximální výkony hlavního a pomocného hořáku na zemní plyn

$$\tau_{DK} = \frac{V_{DK}}{V_{sp, DK, sk, \max}} = \frac{72,04}{35,81} = 2,01 \text{ s} \quad (77)$$

9. Kontrola průtoku plynu hlavním hořákem pro udržení teoretické teploty spalin v počátečním úseku rotační komory

Aby zbytečně teplota spalin nezatěžovala vyzdívku rotační komory s ohledem na její vlastnosti je žádoucí, aby teoretická teplota spalin nepřesáhla teplotu $t_{st} = 1200^\circ\text{C}$. Teplo přivedené spalovacím vzduchem je zanedbatelné a ve výpočtu se neuvažuje.

a) Tepelná bilance počátečního úseku rotační komory

Teplo přivedené odpadem (pevný a kapalný odpad)

$$Q_1 = Q_o \cdot m_o \text{ [kW]} \quad (78)$$

Teplo přivedené zemním plynem hlavního hořáku

$$Q_2 = Q_{zp} \cdot V_{zp} \text{ [kW]} \quad (79)$$

Teplo odvedené spalinami

$$Q_3 = (V_{sp, v, o, c} \cdot m_o + V_{sp, v, zp, c} \cdot V_{zp}) \cdot c_s \cdot t_{st} \text{ [kW]} \quad (80)$$

Velikost měrné tepelné kapacity objemové vychází z dílčích měrných objemových kapacit plynů složek c_i i vodní páry c_p a jejich odpovídajícím objemovým koncentracím ve spalínách bez přebytku vzduchu a z měrné objemové tepelné kapacity vlhkého vzduchu c_v a součinitele přebytku vzduchu α a z koncentrace a měrné hmotnosti tepelné kapacity popílků c_p .

Přibližná velikost měrné tepelné kapacity objemové v závislosti na teplotě je přibližně vyjádřena vztahem

$$c_s = 2,147 \cdot 10^{-4} \cdot t_{st} + 1,46 = 2,147 \cdot 10^{-4} \cdot 1200 + 1,46 = 1,72 \left[kJ / m_N^3 \cdot K \right] \quad (81)$$

b) Sestavení bilanční rovnice

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad [kW] \quad (82)$$

$$Q_o \cdot m_o + Q_{zp} \cdot V_{zp} = (V_{sp, v, o, c} \cdot m_o + V_{sp, v, zp, c} \cdot V_{zp}) \cdot c_s \cdot t_{st} \quad (83)$$

$$18650 \cdot 0,278 + 38000 \cdot V_{zp} = (12,1 \cdot 0,278 + 11,91 \cdot V_{zp}) \cdot 1,72 \cdot 1200$$

$$V_{zp} = 0,133 \left[m_N^3 / s \right] \dots \Rightarrow 479 m_N^3 / hod$$

c) Odpovídající tepelný výkon hlavního hořáku na zemní plyn pro udržení teoretické teploty spalín $t_{st} = 1200^\circ C$ v počátečním úseku rotační komory

$$P_{1zp} = \frac{V_{zp} \cdot Q_{zp}}{3600} = \frac{479 \cdot 38000}{3600} = 5056 [kW] \quad (84)$$

Kontrolní výpočet tepelného výkonu hlavního hořáku prokázal, že výkonnostní parametry hořáku odpovídají zvolenému hořáku na zemní plyn pro teoretickou teplotu spalín $t_{st} = 1200^\circ C$.

Dostatečná výkonnostní rezerva hlavního hořáku zajišťuje, že v případě výpadku pomocného hořáku v dohořivací komoře je možné, po uvážení tepelných ztrát, tento hořák krátkodobě provozovat i na vyšší teoretickou teplotu spalín než $t_{st} = 1200^\circ C$, aby byla zajištěna požadovaná výstupní teplota spalín z dohořivací komory na minimální teplotě $1100^\circ C$ do doby, než dojde k vyhoření veškerého odpadu nacházejícího se v rotační peci.

d) Výpočet skutečného výkonu hlavního hořáku pro teplotu spalin $t_{s1} = 1100^{\circ}\text{C}$

Odpovídající tepelný výkon hlavního hořáku na zemní plyn pro udržení teploty spalin $t_{s1} = 1100^{\circ}\text{C}$ v počátečním úseku rotační komory (uvažuje se stejná měrná tepelná kapacita objemová spalin)

$$Q_o \cdot m_o + Q_{zp} \cdot V_{zp} = (V_{sp, v, o, c} \cdot m_o + V_{sp, v, zp, c} \cdot V_{zp}) \cdot c_s \cdot t_{s1} \quad (85)$$

$$18650 \cdot 0,278 + 38000 \cdot V_{zp} = (12,1 \cdot 0,278 + 11,91 \cdot V_{zp}) \cdot 1,72 \cdot 1100$$

$$V_{zp} = 0,076 [m_N^3 / s] \dots \Rightarrow 274 m_N^3 / \text{hod}$$

$$P_{1zp} = \frac{V_{zp} \cdot Q_{zp}}{3600} = \frac{274 \cdot 38000}{3600} = 2892 [kW] \quad (86)$$

9. NÁVRH JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ ROTAČNÍ PECE A DOHOŘÍVACÍ KOMORY

9.1 Návrh hlavních rozměrů, otáček a sklonu rotační pece

a) Návrh vnitřního průměru rotační pece

Vlastní velikost rotační pece je ovlivněna:

- rozměry kusů a spalovaného materiálu
- konstrukčním a prostorovým řešením čela pece vzhledem k zaústění hlavního hořáku a dávkovacího zařízení

Navrhuji vnitřní průměr rotační pece $d_1 = 2000 \text{ mm}$

b) Návrh délky rotační pece

Dle vztahu pro určení délky rotační pece platí

$$L = K_{1,RP} \cdot (d_1 - 0,5) \cdot K_{2,RP} = 6 \cdot (2 - 0,5) \cdot 1 = 9 \text{ m} \quad (87)$$

Kde $K_{1,RP}$ - koeficient pro zařízení menších výkonů = 5 – 10

$K_{2,RP}$ - koeficient pro zařízení menších výkonů = 1

c) Poměr délky a průměru rotační komory

$$rLd_1 = \frac{L}{d_1} = \frac{9}{2} = 4,5 [-] \quad (88)$$

d) Návrh sklonu rotační pece

Sklon rotační pece volím v souladu s typickým sklonem rotačních pecí $\alpha_s = 2^\circ$

e) Návrh počtu otáček rotační pece

Otáčky pece n_{ot} volím v rozsahu $0,5 - 4 \text{ ot/min}$.

9.2 Proudění spalin a pohyb materiálu v rotační peci

a) Rychlost proudění spalin v rotační peci

Pro určení rychlosti proudění spalin je použito výsledků z výpočtu skutečného množství vzniklých spalin $V_{sp,RP,sk,max} = 28,44 \text{ m}^3 / \text{s}$ v rotační peci pro maximální výkon hlavního hořáku.

$$w_{s1} = \frac{V_{sp,RP,sk,max} \cdot 4}{\pi \cdot d_1^2} = \frac{28,44 \cdot 4}{\pi \cdot 2^2} = 9,05 \text{ m/s} \quad (89)$$

b) Postupná rychlost materiálu v rotační peci pro minimální otáčky rotační pece

$$w_m = \frac{d_1 \cdot n_{ot} \cdot \alpha_s}{0,308 \cdot (\beta_s - 24)} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 2}{0,308 \cdot (120 - 24)} = 0,07 \text{ m/min} \dots \Rightarrow 4,2 \text{ m/hod} \quad (90)$$

c) Postupná rychlost materiálu v rotační peci pro maximální otáčky rotační pece

$$w_m = \frac{d_1 \cdot n_{ot} \cdot \alpha_s}{0,308 \cdot (\beta_s - 24)} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 2}{0,308 \cdot (120 - 24)} = 0,54 \text{ m/min} \dots \Rightarrow 32 \text{ m/hod} \quad (91)$$

β_s koeficient zohledňující stupeň naplnění materiálu v rotační komoře

d) Doba setrvání materiálu v rotační peci pro minimální otáčky rotační pece

$$\tau_1 = \frac{L}{w_m} = \frac{9}{0,07} = 128 \text{ min} \quad (92)$$

e) Doba setrvání materiálu v rotační peci pro maximální otáčky rotační pece

$$\tau_1 = \frac{L}{w_m} = \frac{9}{0,54} = 17 \text{ min} \quad (93)$$

V rotační se uskutečňuje první proces celého spalování. Odpad se při vstupu do pece postupně vysušuje, uvolňuje se prchavá hořlavina a při zahřátí odpadu na zápalnou teplotu odpad začne hořet.

Zbytkový popel a struska po vyhoření odchází z rotační komory do vodního uzávěru a odtud jsou vynašečem dopravovány k separaci magnetických kovů.

Výpočet hmotnosti rotační pece

Zadané hodnoty:

Vnitřní průměr rotační pece	$d_1 = 2000 \text{ mm}$
Vnitřní průměr po izolační vyzdívku	$d_2 = 2320 \text{ mm}$
Vnitřní průměr po tepelnou izolaci	$d_3 = 2600 \text{ mm}$
Vnitřní průměr po ocelový plášť	$d_4 = 2760 \text{ mm}$
Vnější průměr pláště rotační pece	$d_5 = 2780 \text{ mm}$
Vnitřní průměr nosné obruče	$d_6 = 3060 \text{ mm}$
Vnější průměr nosné obruče	$d_7 = 3220 \text{ mm}$
Délka pece	$L = 9000 \text{ mm}$
Šířka nosné obruče	$b_o = 160 \text{ mm}$
Šířka ozubeného věnce	$b_v = 140 \text{ mm}$
Objemová hmotnost 1. vrstvy vyzdívky	$\rho_{1,v} = 2320 \text{ kg/m}^3$
Objemová hmotnost 2. vrstvy vyzdívky	$\rho_{2,v} = 700 \text{ kg/m}^3$
Objemová hmotnost tepelné izolace	$\rho_{ti} = 80 \text{ kg/m}^3$
Objemová hmotnost oceli	$\rho_{Fe} = 7800 \text{ kg/m}^3$

a) Hmotnost vyzdívky 1. vrstvy

$$m_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_1^2) \cdot L \cdot \rho_{1,v} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,32^2 - 2^2) \cdot 9 \cdot 2320 = 22670 \text{ kg} \quad (94)$$

b) Hmotnost izolační vyzdívky 2. vrstvy

$$m_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_3^2 - d_2^2) \cdot L \cdot \rho_{2,v} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,6^2 - 2,32^2) \cdot 9 \cdot 700 = 6816 \text{ kg} \quad (95)$$

c) Hmotnost tepelné izolace

$$m_3 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_4^2 - d_3^2) \cdot L \cdot \rho_{ii} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,76^2 - 2,6^2) \cdot 9 \cdot 80 = 485 \text{ kg} \quad (96)$$

d) Hmotnost ocelového pláště pece

$$m_4 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_5^2 - d_4^2) \cdot L \cdot \rho_{ii} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,78^2 - 2,76^2) \cdot 9 \cdot 7800 = 6109 \text{ kg} \quad (97)$$

e) Celková hmotnost rotační pece

$$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = 22670 + 6816 + 485 + 6109 = 36080 \text{ kg} \quad (98)$$

Výpočet hmotnosti rotační pece byl proveden z důvodu dimenzování pohonu rotační pece, převodového stupně návrhu ložisek a spojkových stupňů. Tento návrh překračuje rozsah diplomové práce a není tímto dále uvažován.

9.3 Vyzdívka rotační pece

Vyzdívka rotační pece je z vnitřní strany vyzděna žáruvzdornou vyzdívkou odolávající vysokým teplotám, mechanickému namáhání a chemickému působení. Při návrh složení jednotlivých vrstev pláště rotační komory je brán ohled na to, aby teplota povrchu pláště rotační pece nepřesáhla 80°C. Z tohoto důvodu je mezi izolační vrstvu žáruvzdorné vyzdívky a vnější plášť rotační komory vložena vrstva tepelné izolace.



Obrázek 26 - Pohled na vyzdívku rotační komory firmy BIC [29]

Pro první vrstvu je navržena žáruvzdorná vyzdívka firmy Höganäs Bjuf AB/Švédsko vyznačující se vysokým procentuálním podílem oxidu hlinitého a oxidu železitého, které mají významný vliv na její trvanlivost, co se týká teplotní odolnosti a pevnosti. Materiál vyzdívky zaručuje žáruvzdornost materiálu do maximální teploty 1550°C.

Druhou vrstvu žáruvzdorné izolační vyzdívky tvoří tvarovky firmy P-D Refractories CZ a.s opět s vyšším obsahem oxidu hlinitého. Třetí vrstva je tvořena tepelnou izolací firmy Rockwool zaručující dodržení maximální požadované teploty pláště rotační pece. Hodnoty jednotlivých součinitelů tepelné vodivosti určeny s ohledem na teplotu, které jsou jednotlivé vrstvy rotační pece vystaveny. Složení jednotlivých vrstev pláště rotační pece viz tabulka níže.

Hodnota součinitele přestupu tepla na vnitřní straně rotační pece byla spočítána pomocí softwarového programu EES (Engineering Equation Solver) a je součástí přílohy A.

Mezi hlavní elementy přenosu tepla za vysokých teplot v případě rotační pece jsou konvekce a radiace. Výpočet uvažuje s přestupem tepla ze spalin do vnitřního povrchu spalovací komory, kdy je navíc vlastní součinitel přestupu tepla α_{RP} rozdělen zvlášť na součinitel přestupu tepla sáláním α_{sa} a konvekcí α_k . Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci na vnější straně volen $\alpha_o = 7 \text{ W} / \text{K} \cdot \text{m}^2$

Pro výpočet přestupu tepla sáláním je nutné určení přibližné koncentrace složek CO_2 a H_2O ve spalinách z důvodu určení koeficientů stanovujících intenzitu záření plynů.

a) Množství plynných složek CO_2 odpadu ve spalinách:

$$V_{\text{CO}_2}^o = \frac{22,4}{12} \cdot C = \frac{22,4}{12} \cdot 0,76 = 1,42 \text{ m}_N^3 / \text{kg} \quad (99)$$

Nebezpečné odpady se vyznačují vysokým obsahem uhlíku ($C = 70 - 86\%$), z tohoto důvodu volím obsah uhlíku v odpadu $C = 76\%$

b) Množství plynných složek CO_2 ze spalování zemního plynu ve spalinách:

Typické složení zemního plynu

$$\text{CH}_4 = 98,13\%, \text{C}_2\text{H}_6 = 0,74\%, \text{CO}_2 = 0,26\%$$

$$V_{\text{CO}_2}^{zp} = \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + \text{CO}_2 = 0,9813 + 2 \cdot 0,0074 + 0,0021 = 0,998 \text{ m}_N^3 / \text{m}_N^3 \quad (100)$$

c) Koncentrace složek CO_2 ve spalinách

$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}^o \cdot m_o + V_{CO_2}^{zp} \cdot m_{zp}}{V_{sp, RP, \max}} \cdot 100 = \frac{1,42 \cdot 0,278 + 0,998 \cdot 0,206}{5,81} \cdot 100 = 10,3\% \quad (101)$$

d) Koncentrace složek H_2O ve spalínách

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_w^o \cdot m_o + V_w^{zp} \cdot m_{zp}}{V_{sp, RP, \max}} \cdot 100 = \frac{1,27 \cdot 0,278 + 1,06 \cdot 0,206}{5,81} \cdot 100 = 9,8\% \quad (101)$$

Určení korekčního součinitele β pro záření plynů a par a určení integrálních emisivit ε_{H_2O} a ε_{CO_2} z literatury [29] [30].

Tabulka 6 – Určení korekčního součinitele a integrálních emisivit

β	0,8
ε_{H_2O}	0,13
ε_{CO_2}	0,115

V rámci výpočtu je uvažována kombinace přestupu tepla sáláním a nucenou konvekci pro zvolenou teplotu spalin v rotační komoře, tedy $t_{s1} = 1100^\circ C$ a rychlosti proudění spalin v rotační peci $w_{s1} = 9,05 \text{ m/s}$. Navrhovaná skladba vyzdívky rotační komory viz tabulka níže.

Navrhované složení vyzdívky rotační pece v tabulce č.7.

Tabulka 7 - Složení jednotlivých vrstev pláště rotační pece

	Materiál	$\lambda [W/m \cdot K]$	Tloušťka
1. vrstva	ALEX	1,2	160 mm
2. vrstva	SL 7P – 140	0,14	140 mm
3. vrstva	Techrock 80	0,072	80 mm
4. vrstva	Ocelový plášť	41,5	10 mm
Celkem			390 mm

e) Výpočet lineární hustoty tepelného toku při prostupu tepla složenou válcovou stěnou.

$$q_{l,RP} = \frac{\pi \cdot (t_{s1} - t_{ok})}{\frac{1}{d_1 \cdot \alpha_{RP}} + \sum \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{d_5 \cdot \alpha_{ok}}} = \frac{\pi \cdot (1100 - 20)}{\frac{1}{2 \cdot 133,2} + \frac{1}{2 \cdot 1,2} \cdot \ln \frac{2,32}{2} + \frac{1}{2 \cdot 0,14} \cdot \ln \frac{2,6}{2,32} + \frac{1}{2 \cdot 0,072} \cdot \ln \frac{2,76}{2,6} + \frac{1}{2 \cdot 41,5} \cdot \ln \frac{2,78}{2,76} + \frac{1}{2,78 \cdot 7}} = 3614 [W \cdot m^{-1}]$$

(102)

f) Výpočet povrchových teplot na rozhraní jednotlivých vrstev pláště rotační komory

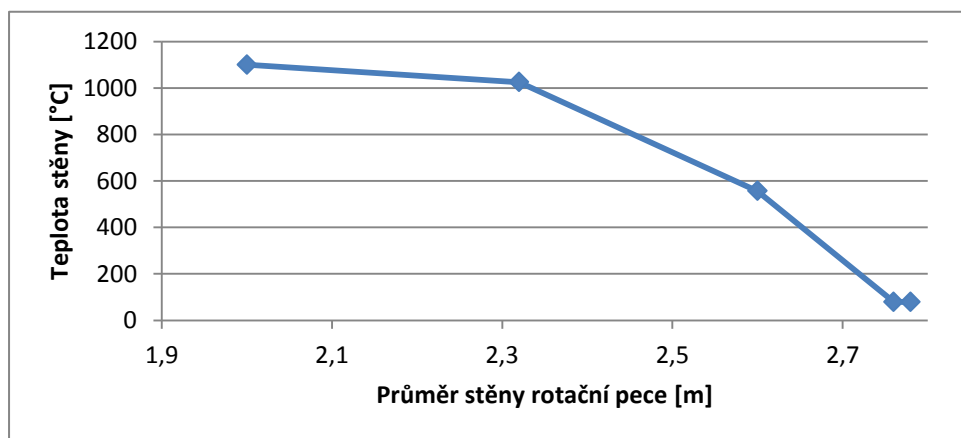
$$t_{k+1} = t_{s1} - \frac{q_{l,RP}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot r_1 \cdot \alpha_{RP}} + \sum \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \frac{r_{i+1}}{r_i} \right) [^{\circ}C]$$

(103)

Výpočty jednotlivých povrchových teplot jsou přehledně vyobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 8 – Povrchové teploty jednotlivých vrstev rotační pece

Popis	Teplota (°C)
Teplota spalin	1100
Povrchová teplota na rozmezí 1. a 2. vrstvy	1025
Povrchová teplota na rozmezí 2. a 3. vrstvy	556
Povrchová teplota na rozmezí 3. a 4. vrstvy	79
Povrchová teplota pláště rotační pece	79
Teplota okolí	20



Obrázek 27 - Závislost povrchových teplot jednotlivých vrstev na průměru rotační pece

g) Lineární součinitel prostupu tepla pro složenou válcovou stěnu

$$k_{l,RP} = \frac{1}{\frac{1}{d_1 \cdot \alpha_{RP}} + \sum \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{d_5 \cdot \alpha_{ok}}} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 133,2} + \frac{1}{2 \cdot 1,2} \cdot \ln \frac{2,32}{2} + \frac{1}{2 \cdot 0,14} \cdot \ln \frac{2,6}{2,32} + \frac{1}{2 \cdot 0,072} \cdot \ln \frac{2,76}{2,6} + \frac{1}{2 \cdot 41,5} \cdot \ln \frac{2,78}{2,76} + \frac{1}{2,78 \cdot 7}} = 1,065 [W / m \cdot K]$$

(104)

h) Tepelný tok prostupem tepla složenou válcovou stěnou

$$P_{z,RP} = \frac{\pi \cdot L \cdot (t_{s1} - t_{ok})}{\frac{1}{2 \cdot r_1 \cdot \alpha_{RP}} + \sum \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{2 \cdot r_5 \cdot \alpha_{ok}}} = \frac{\pi \cdot 9 \cdot (1100 - 20)}{\frac{1}{2 \cdot 1 \cdot 133,2} + \frac{1}{2 \cdot 1,2} \cdot \ln \frac{1,16}{1} + \frac{1}{2 \cdot 0,14} \cdot \ln \frac{1,3}{1,16} + \frac{1}{2 \cdot 0,072} \cdot \ln \frac{1,38}{1,3} + \frac{1}{2 \cdot 41,5} \cdot \ln \frac{1,39}{1,38} + \frac{1}{2 \cdot 1,39 \cdot 7}} = 32529 [W]$$

(105)

9.4 Čelo rotační pece

Čelo rotační pece plní následující funkce:

- Zaústění dávkovacího zařízení pístového podavače
- Zaústění rozprašovací trysky kapalného odpadu
- Zaústění hlavního plynového hořáku
- Zaústění primárního vzduchu pro první stupeň spalování
- Aplikace měřidel pro měření teploty a podtlaku

Kostru čela rotační komory tvoří svařovaný rám z profilované oceli a vyztuženými žebry. Těsnící segmenty oddělují spalovací prostor od okolní atmosféry. Segmenty jsou podle míry opotřebení dotlačovány k plášti pece pružinami. Na stejném principu je provedeno těsnění mezi dohořivací komorou a rotační pecí.



Obrázek 28 – Ilustrační obrázek zobrazující čelo rotační pece [24]

Primární spalínový vzduch je dopravován do rotační komory prostřednictvím vzduchového ventilátoru, který nasává vzduch z prostor pro manipulaci s odpadem a skladování odpadu. Další vzduch může být do spalovací komory přisáván jako falešný vzduch přes netěsnosti pístového podavače nebo netěsnostmi mezi čelem pece a vlastní spalovací komorou.



Obrázek 29 - Pohled na čelo rotační pece [45]

Vlastní rám čela rotační pece je možné z důvodu pravidelných odstávek zařízení uvolnit a odtáhnout a umožnit inspekci vnitřních prostor spalovací komory.

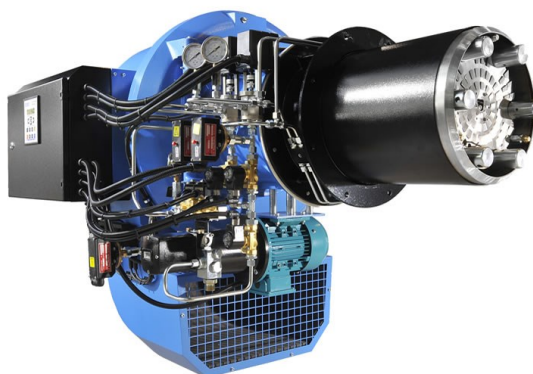
9.5 Hlavní hořák

Hlavní hořák je umístěn v čele rotační pece s osou souběžnou s podélnou osou spalovací komory. Hořák umožňuje rovnoměrně vyplňovat prostor spalovací komory tak, aby se plamen hořáku nedotýkal vnitřního povrchu vyzdívky spalovací komory.

Vlastní výkon hlavního hořáku je dimenzován s rezervou pro případ, že by došlo k výpadku pomocného hořáku v dohořivací komoře. V tomto případě je zastaven přísun odpadu do spalovací komory s tím, že tepelný výkon hořáku udržuje požadovanou teplotu na výstupu z dohořivací komory do doby, než dojde ke spálení posledních zbytků odpadu v rotační komoře.

Technické parametry plynového hořáku Dunphy TG 420YM:

Vstupní tlak plynu	5,0 - 20,0 kPa (50 - 200 mbar)
Minimální výkon	1250 kW
Maximální výkon	6500 kW
Elektrický příkon/napětí	15 kW/400V
Maximální přetlak ve spalovací komoře	2500 Pa

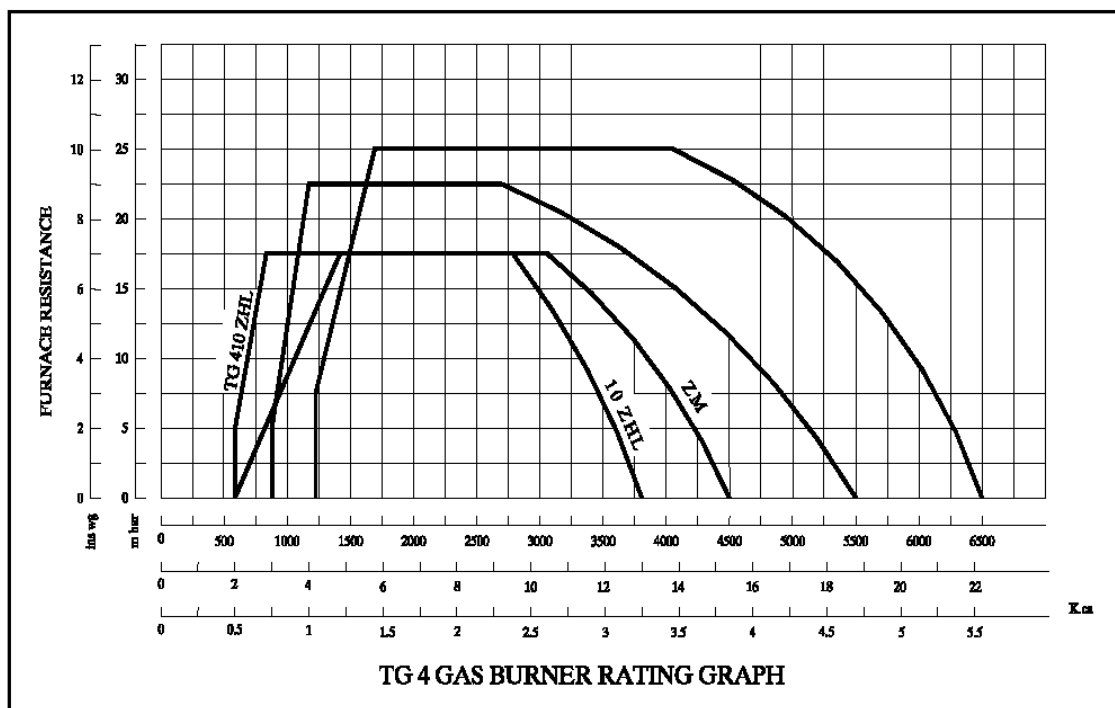


Obrázek 30 – Hlavní hořák na zemní plyn Dunphy TG 420YM [31] [34]

Provoz hlavního hořáku je plně automatický s nuceným přívodem spalovacího vzduchu. Zapalování hořáku se provádí pomocí zapalovacího hořáku, který je součástí hlavního hořáku. Hlídač plamene zabezpečuje díky rychlouzavíracím armaturám uzavření přívodu paliva v případě ztráty plamene.

Hlavní hořák je v provozu jistěn proti těmto poruchám:

- Zhasnutí plamene
- Přerušení dodávky plynu nebo elektrické energie
- Pokles tlaku, pokles tlaku primárního vzduchu
- Překročení maximální teploty zařízení



Obrázek 31 - Výkonnostní charakteristika hlavního hořáku [31]

9.6 Hydraulické dávkovací zařízení

Dávkování pevného a pastovitého odpadu je do čela pece zajištěno dávkováním pístového podavače, který svým provedením nedovoluje prošlehnutí plamene do násypky. Vlastní násypka je umístěna kolmo k rotační peci a dávkování odpadu je zajištěno polypovým drapákem.

Hydraulické dávkovací zařízení se skládá z dávkovacího pístu, který je poháněn hydraulickou jednotkou. Přívod tlakového oleje do přední a zadní části hydraulického válce je přiváděn tlakovými hadicemi z hydraulické jednotky. Zdvih pístnice hydraulického válce je nastavitelný.

Dávkovací píst je opatřen stíracími kroužky a je upevněn ve vodících kladkách upevněných na rámu čela pece. Zařízení má tichý, spolehlivý a plynulý chod.

9.7 Násypka

Násypka je provedena jako svařenec z ocelového plechu a je vyztužena profilovanými žebry. Násypka se směrem k dávkovacímu zařízení rozšiřuje a tím je zajištěno riziko ucpání násypného otvoru.

Násypka je vybavena uzavíratelnými šoupátky, které zajišťují zamezení vznícení odpadů v zásobníku a jsou poháněny dvojicí hydraulických válců. Při plnění zásobníku je spodní šoupátko uzavřeno. Po naplnění se spodní šoupátko otevře a horní šoupátko se uzavře. Materiál propadá do dávkovacího zařízení a písty je dopravován do rotační komory.

9.8 Dohořivací komora

Úplné vyhoření spalin zaručí dohořivací komora, která je umístěna za rotační pecí. Je vybavena pomocným stabilizačním hořákem na zemní plyn, který zajišťuje udržování požadované teploty na výstupu z dohořivací komory.

Spodní část dohořivací komory slouží jako směsná zóna pro spaliny. Přívod sekundárního vzduchu se uskutečňuje pomocí trysek. Jednotlivé trysky jsou skloněny pod úhlem 45°C směrem nahoru, aby umožňovaly protiproudé mísení spalin a sekundárního spalovacího vzduchu. Minimální doba zdržení spalin jsou 2s a výstupní teplota spalin z dohořivací komory je minimálně 1100°C.

Z dohořivací komory odchází spaliny kouřovodem do kotle na odpadní teplo. Součástí dohořivací komory je bezpečnostní klapka kvůli ochraně technologie při výpadku elektrické energie nebo poruše spalínového ventilátoru.

Na komoru je napojen nouzový komín, jehož klapka se ovládá pneumatickým válcem.

Rozměry dohořivací komory jsou vypočítány s ohledem na množství produkováných spalin a dobu zdržení spalin v dohořivací komoře patrný z výkresu.

Parametry dohořivací komory:

Průměr dohořivací komory d_{DK} a výška dohořivací komory h_{DK} (mezi přívodem sekundárního vzduchu a výstupem spalin)

$$d_{DK} = 3700 \text{ mm}$$

$$h_{DK} = 6700 \text{ mm}$$

- a) Rychlost proudění spalin v dohořivací komoře je určena na základě skutečného maximálního množství spalin v dohořivací komoře při teplotě $t_{s2} = 1200^{\circ}\text{C}$

$$w_{s2} = \frac{V_{sp, DK, sk, max} \cdot 4}{\pi \cdot d_{DK}^2} = \frac{35,81 \cdot 4}{\pi \cdot 3,7^2} = 3,33 \text{ m/s} \quad (106)$$

b) Doba setrvání spalin v dohořivací komoře

$$\tau_2 = \frac{h_{DK}}{w_{s2}} = \frac{6,7}{3,33} = 2,01 \text{ s} \quad (107)$$

9.9 Vyzdívka dohořivací komory

Vyzdívka dohořivací komory je stejně jako rotační pec z vnitřní strany vyzděna žáruvzdornou vyzdívkou odolávající vysokým teplotám, mechanickému namáhání a chemickému působení. Při návrh složení jednotlivých vrstev pláště dohořivací komory je brán ohled na to, aby teplota povrchu pláště pro maximální výkon spalovací jednotky nepřesáhla 80°C. Z tohoto důvodu je mezi izolační vrstvou žáruvzdorné vyzdívky a vnější plášť rotační komory vložena vrstva tepelné izolace.

Po první vrstvu je navržena žáruvzdorná vyzdívka firmy Höganäs Bjuf AB/Švédsko vyznačující se vysokým procentuálním podílem oxidu hlinitého a oxidu železitého, které mají významný vliv na její trvanlivost, co se týká teplotní odolnosti a pevnosti. Materiál vyzdívky zaručuje žáruvzdornost materiálu až do teploty 1550°C.

Druhou vrstvu žáruvzdorné izolační vyzdívky tvoří tvarovky firmy P-D Refractories CZ a.s opět s vyšším obsahem oxidu hlinitého. Třetí vrstva je tvořena tepelnou izolací firmy Rockwool zaručující dodržení maximální požadované teploty pláště dohořivací komory. Hodnoty jednotlivých součinitelů tepelné vodivosti určeny s ohledem na teplotu, které jsou jednotlivé vrstvy dohořivací komory vystaveny. Složení jednotlivých vrstev dohořivací komory viz tabulka níže.

Hodnota součinitele přestupu tepla na vnitřní straně rotační pece byla spočítána pomocí softwarového programu EES (Engineering Equation Solver) a je součástí přílohy B.

Mezi hlavní elementy přenosu tepla za vysokých teplot v případě dohořivací komory jsou konvekce a radiace. Výpočet uvažuje s přestupem tepla ze spalin do vnitřního povrchu dohořivací komory, kdy je navíc vlastní součinitel přestupu tepla α_{DK} rozdělen zvlášť na součinitel přestupu tepla sáláním α_{sa} a konvekcí α_k . Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci na vnější straně volen $\alpha_o = 7 \text{ W/K} \cdot \text{m}^2$

Pro výpočet přestupu tepla sáláním je nutné určení přibližné koncentrace složek CO_2 a H_2O ve spalínách z důvodu určení koeficientů stanovujících intenzitu záření plynů.

a) Koncentrace složek CO_2 ve spalínách

$$\omega_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}^o \cdot m_o + V_{\text{CO}_2}^{zp} \cdot m_{zp} + V_{\text{CO}_2}^{zp} \cdot m_{zp}}{V_{sp, DK, \max}} \cdot 100 = \frac{1,42 \cdot 0,278 + 0,998 \cdot 0,206 + 0,998 \cdot 0,07}{6,64} \cdot 100 = 10\%$$

(108)

b) Koncentrace složek H_2O ve spalínách

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_w^o \cdot m_o + V_w^{zp} \cdot m_{zp} + V_w^{zp} \cdot m_{zp}}{V_{sp, DK, \max}} \cdot 100 = \frac{1,27 \cdot 0,278 + 1,06 \cdot 0,206 + 1,06 \cdot 0,07}{6,64} \cdot 100 = 9,7\%$$

(109)

Hodnoty korekčního součinitele β pro záření plynů a par a určení integrálních emisivit $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ a $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ jsou téměř totožné jako v případě rotační pece, proto byly pro další výpočty použity stejné hodnoty.

V rámci výpočtu je uvažována kombinace přestupu tepla sáláním a nucenou konvekci pro zvolenou teplotu spalín v dohořivací komoře, tedy $t_2 = 1200^\circ\text{C}$ a rychlosti proudění spalín v dohořivací komoře $w_{s2} = 3,33 \text{ m/s}$. Navrhovaná skladba vyzdívky dohořivací komory dle tabulky níže.

Navrhované složení vyzdívky rotační pece v tabulce č. 9.

Tabulka 9 - Složení jednotlivých vrstev pláště dohořivací komory

	Materiál	$\lambda [W / m \cdot K]$	Tloušťka
1. vrstva	ALEX	1,3	160 mm
2. vrstva	SL 7P – 140	0,17	180 mm
3. vrstva	Techrock 120	0,078	120 mm
4. vrstva	Ocelový plášť	41,5	10 mm
Celkem			470 mm

c) Výpočet lineární hustoty tepelného toku při prostupu tepla složenou válcovou stěnou.

$$q_{l,DK} = \frac{\pi \cdot (t_{s2} - t_{ok})}{\frac{1}{d_{DK} \cdot \alpha_{DK}} + \sum \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{d_5 \cdot \alpha_{ok}}} = \frac{\pi \cdot (1200 - 20)}{\frac{1}{2 \cdot 142,1} + \frac{1}{2 \cdot 1,3} \cdot \ln \frac{4,02}{3,7} + \frac{1}{2 \cdot 0,17} \cdot \ln \frac{4,38}{4,02} + \frac{1}{2 \cdot 0,078} \cdot \ln \frac{4,62}{4,38} + \frac{1}{2 \cdot 41,5} \cdot \ln \frac{4,64}{4,62} + \frac{1}{4,64 \cdot 7}} = 5627 [W \cdot m^{-1}]$$

(110)

d) Výpočet povrchových teplot na rozhraní jednotlivých vrstev pláště dohořivací komory

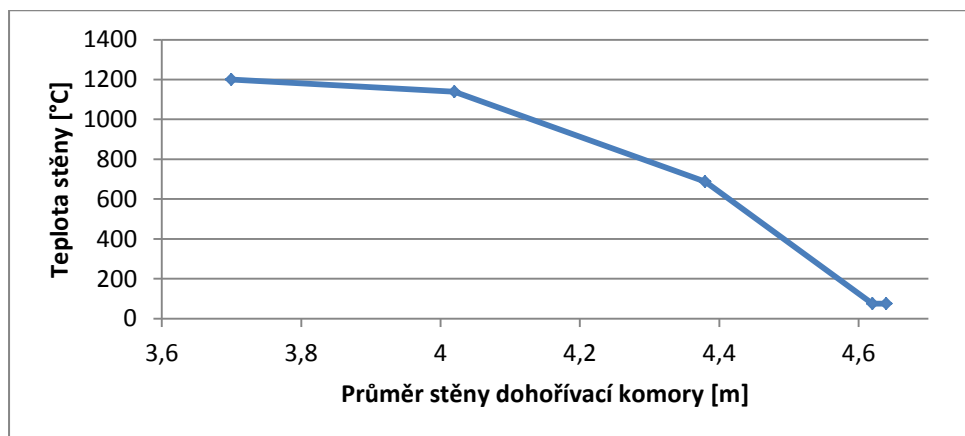
$$t_{k+1} = t_{s2} - \frac{q_{l,DK}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot r_1 \cdot \alpha_{DK}} + \sum \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \frac{r_{i+1}}{r_i} \right) [^{\circ}C]$$

(111)

Výpočty jednotlivých povrchových teplot jsou přehledně vyobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 10 Povrchové teploty jednotlivých vrstev dohořivací komory

Popis	Teplota (°C)
Teplota spalin	1200
Povrchová teplota na rozmezí 1. a 2. vrstvy	1139
Povrchová teplota na rozmezí 2. a 3. vrstvy	688
Povrchová teplota na rozmezí 3. a 4. vrstvy	75
Povrchová teplota pláště rotační pece	75
Teplota okolí	20



Obrázek 32 – Závislost povrchových teplot jednotlivých vrstev na průměru dohořivací komory

e) Lineární součinitel prostupu tepla pro složenou válcovou stěnu

$$k_{l, DK} = \frac{1}{\frac{1}{d_{DK} \cdot \alpha_{DK}} + \sum \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{d_5 \cdot \alpha_{ok}}} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 142,1} + \frac{1}{2 \cdot 1,3} \cdot \ln \frac{4,02}{3,7} + \frac{1}{2 \cdot 0,17} \cdot \ln \frac{4,38}{4,02} + \frac{1}{2 \cdot 0,078} \cdot \ln \frac{4,62}{4,38} + \frac{1}{2 \cdot 41,5} \cdot \ln \frac{4,64}{4,62} + \frac{1}{4,64 \cdot 7}} = 1,518 [W \cdot m^{-1}]$$

(112)

f) Tepelný tok prostupem tepla složenou válcovou stěnou

$$P_{z, DK} = \frac{\pi \cdot h_{DK} \cdot (t_{s2} - t_{ok})}{\frac{1}{2 \cdot r_{DK} \cdot \alpha_{RP}} + \sum \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{2 \cdot r_5 \cdot \alpha_{ok}}} = \frac{\pi \cdot 6,7 \cdot (1200 - 20)}{\frac{1}{2 \cdot 1,85 \cdot 142,1} + \frac{1}{2 \cdot 1,3} \cdot \ln \frac{2,01}{1,85} + \frac{1}{2 \cdot 0,17} \cdot \ln \frac{2,19}{2,01} + \frac{1}{2 \cdot 0,078} \cdot \ln \frac{2,31}{2,19} + \frac{1}{2 \cdot 41,5} \cdot \ln \frac{2,32}{2,31} + \frac{1}{2 \cdot 2,32 \cdot 7}} = 37697 [W]$$

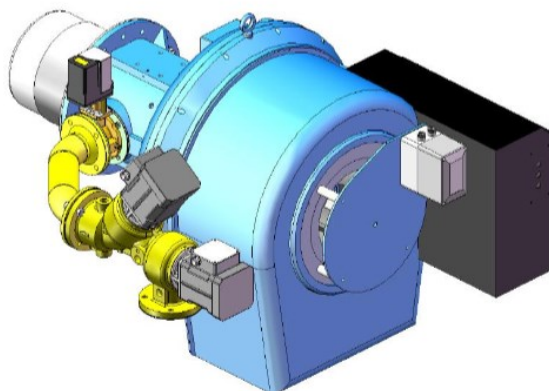
(113)

9.10 Pomocný hořák v dohořivací komoře

Pomocný hořák je umístěn v dohořivací komoře tak, aby se plamen hořáku dostatečně směřoval se spaliny proudící z rotační pece. Tepelný výkon hořáku je navržen s ohledem na udržování minimální požadované výstupní teploty spalin

z dohořívací komory. Umístění pomocného hořáku přibližně v ose rotační pece umožňuje udržovat vysokou teplotu v oblasti výstupní části rotační pece z důvodu zamezení vzniku nálepů popelových složek.

Provoz hlavního hořáku je plně automatický s nuceným přívodem spalovacího vzduchu. Zapalování hořáku se provádí pomocí zapalovacího hořáku, který je součástí hlavního hořáku. Hlídač plamene zabezpečuje díky rychlouzavíracím armaturám uzavření přívodu paliva v případě ztráty plamene.



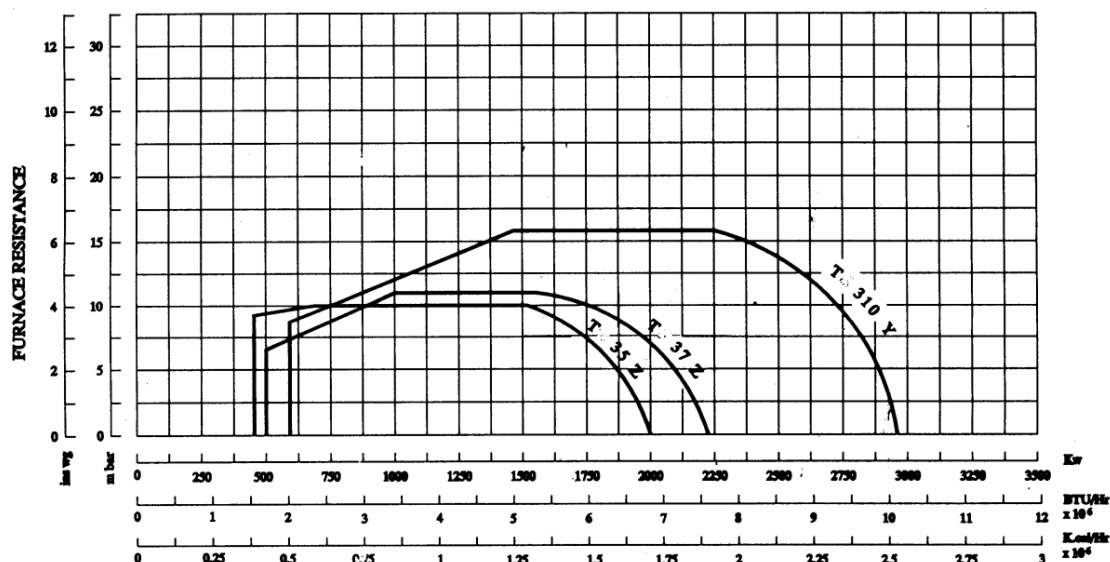
Obrázek 33 – Pomocný hořák Dunphy TG 35ZHL [32]

Hlavní hořák je v provozu jištěn proti těmto poruchám:

- Zhasnutí plamene
- Přerušení dodávky plynu nebo elektrické energie
- Pokles tlaku, pokles tlaku primárního vzduchu
- Překročení maximální teploty zařízení

Technické parametry plynového hořáku Dunphy TG 35ZHL

Vstupní tlak plynu	5,0 - 20,0 kPa (50 - 200 mbar)
Minimální výkon	475 kW
Maximální výkon	2200 kW
Elektrický příkon/napětí	3 kW/400V
Maximální přetlak ve spalovací komoře	2500 Pa



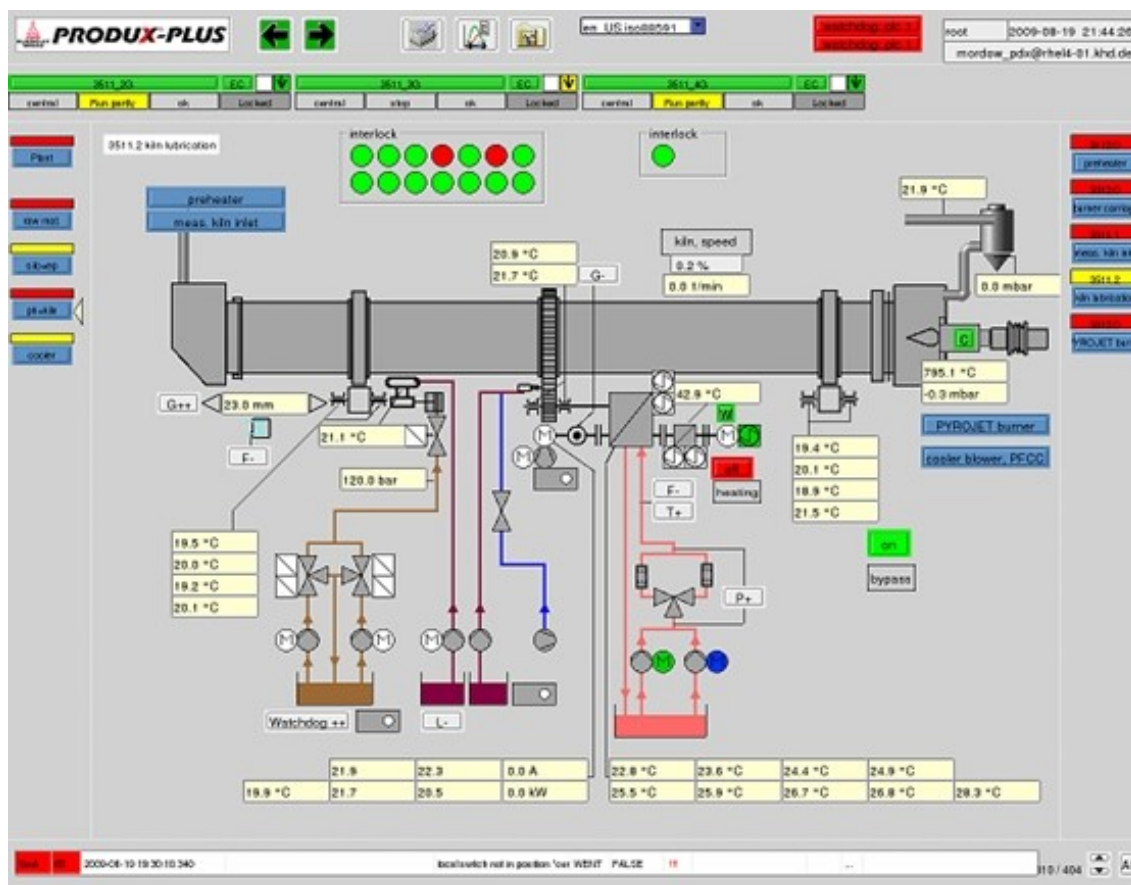
Obrázek 34 - Výkonnostní charakteristika pomocného hořáku [32]

9.11 Regulace spalovacího procesu

Spalovna je určena pro likvidaci tuhých a kapalných odpadů. Z tohoto důvodu je nutné zamezit pronikání spalin do prostoru spalovací jednotky. Tato podmínka bude splněna jen v případě, že bude v celém zařízení udržován trvalý podtlak. Optimální hodnota podtlaku p_1 je v rotační peci regulována podle žádané hodnoty podtlaku p_z regulační klapkou, umístěnou před spalinovým ventilátorem, kterým se vyrovnávají narůstající tlakové ztráty v technologickém zařízení.

Podle hodnoty podtlaku p_1 snímaného v rotační peci elektrickým tlakoměrem, je také řízena automatická regenerace filtrů, která je zajišťována krátkodobým zpětným ofukem. Při poklesu podtlaku vyšle regulátor signál ke spuštění automatické regenerace, která by měla proběhnout před vsazením nové dávky odpadů, kdy je v peci nejnižší teplota. Regulační obvod regenerace filtrů má proto vazbu i na teplotu t_{s1} v komoře rotační pece.

Základní podmínkou pro ustálený provoz spalovny je udržení teplot v termickém bloku v žádaném teplotním intervalu. Dolní mez je stanovena teplotou, která zajišťuje nejen důkladné prohoření odpadu v rotační peci a požadovanou výstupní teplotou z dohořivací komory. Horní mez se řídí teplotní únosností zařízení.



Obrázek 35 – Ilustrační obrázek řídicího systému spalování v rotační peci [33]

První dávka odpadu je vsazena do spalovacího zařízení až po jejím vyhřátí hlavním a pomocným hořákem na určenou teplotu. Hořák je dimenzován na konstantní tepelný výkon a je řízen z ovládacího panelu dle teploty t_{s1} . Dojde-li při spalování odpadu v rotační komoře ke zvýšení teploty, může být hořák odstaven. V případě poklesu teploty pod požadovanou teplotu, výkon hlavního hořáku bude navýšen zvýšením průtoku zemního plynu.

Dohořivací komora je otápěna pomocným hořákem, který dohřívá spaliny na minimální požadovanou teplotu na výstupu z dohořivací komory t_{s2} . V průběhu spalovacího procesu je tepelný výkon hlavního hořáku regulován na udržení výstupní teploty spalin z rotační pece na teplotě 1100°C. Pomocný hořák svým tepelným výkonem dohřívá spaliny na minimální požadovanou teplotu 1100°C na výstupu z dohořivací komory podle aktuální teploty snímanou termočlánkem.

Regulace množství primárního a sekundárního vzduchu je řízena podle poklesu obsahu kyslíku ve spalinách. Potřebný spalovací vzduch je do spalovacího prostoru distribuován regulačními klapkami podle aktuální charakteristiky spalovacího procesu.

Obsah kyslíku ve spalinách, který je určován podle kyslíkové sondy umístěné za dohořivací komorou, je vázáno také dávkování odpadu. Dávkování by mělo proběhnout v případě, až teplota t_{s1} v komoře rotační pece klesne pod žádanou hodnotu teploty t_{1z} . Regulační obvod pro dávkování odpadu má proto vazbu na i na teplotu t_{s1} , která je měřena v rotační peci pomocí termočlánku.

10. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá návrhem spalovacího zařízení využívající technologii rotační pece pro spalování nebezpečných odpadů. Hodinový výkon spalovací jednotky je 1000 kg/h . Úvod diplomové práce se zabývá problematikou nebezpečného odpadu a problematice spalování nebezpečných odpadů v České republice.

Následující část je věnována porovnání různých způsobů spalování nebezpečného odpadu a jejich základním popisem. Odpad lze spalovat v různých typech ohnišť, nicméně nejvýhodnějším způsobem likvidace tohoto typu odpadu je spalování v rotačních spalovacích zařízeních. Problematika spalování nebezpečného odpadu je dostatečně popsána v kapitole zabývající se teorií spalování v rotačních ohništích a kapitole věnované popisu kompletní technologie spalovny.

Návrh rotační pece je zpracován s ohledem na legislativní a konstrukční požadavky s ohledem na dobu setrvání spalin v dohořivací komoře. Navazující zařízení musí být dimenzována s ohledem na splnění ekologických limitů tuhých a plyných emisí.

Dávkovací zařízení je hydraulické zajišťující tichý chod, spolehlivost a bezpečnost provozu. Rozměry spalovací komory byly navrženy tak, aby splnili obecné parametry s ohledem na poměr délky a průměru rotační pece, sklonu a dobu setrvání odpadu v rotační peci vzhledem k otáčkám.

Dohořivací komora je navržena tak, aby byla splněna zákonem stanovená podmínka na dobu setrvání spalin v dohořivací komoře dvě sekundy a teplotu spalin vystupující z dohořivací komory na minimální hodnotě 1100°C . Vyzdívkové a izolační materiály jsou navrženy s ohledem na povrchovou teplotu pláště rotační komory při maximálním výkonu zařízení a tepelné ztráty.

Součástí diplomové práce jsou výpočty prostupů tepla rotační pecí a dohořivací komory.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] - Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů („zákon o odpadech“) [cit. 2014-11-15]

[2] Produkce odpadů kraje 2003_2013 [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z http://www1.cenia.cz/www/sites/default/files/Produkce_odpadu_kraje_2003_2013.pdf

[3] -Vyhláška č.381/2001 Sb Vyhláška Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů) [cit. 2014-11-15]

[4] - Zákon č. 483/2008 Sb., kterým se mění zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší), ve znění pozdějších předpisů [cit. 2014-11-15]

[5] - Nařízení vlády č. 354/2002 Sb., kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu [cit. 2014-11-15]

[5] Seznam nebezpečných vlastností odpadu [online]. 2014 [2014-12-18] <http://www.inisoft.cz/strana/zakon-185-2001-p2>

[6] OBROUČKA, Karel: Termické zneškodňování odpadů. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1997, 140 s. ISBN 80-7078-505-5.

[7] RYBÍN, Miroslav: Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1978, 414 s.

[8] Shrnutí Referenčního dokumentu o nejlepších dostupných technikách pro průmysl zpracování odpadů [online]. 2005 [2015-02-02] Dostupné z [http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/CENMSFLZ7HNS/\\$FILE/P%C5%99eklad%20BREF%20Zpracov%C3%A1n%C3%AD%20odpad%C5%AF.pdf](http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/CENMSFLZ7HNS/$FILE/P%C5%99eklad%20BREF%20Zpracov%C3%A1n%C3%AD%20odpad%C5%AF.pdf)

[9] Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů [online]. 2005 [2015-02-10] Dostupné z [http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/CENMSFLZ7EX4/\\$FILE/20080407_BREF_WI_CZ_final.pdf](http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/CENMSFLZ7EX4/$FILE/20080407_BREF_WI_CZ_final.pdf)

- [10] Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants [online]. 2005 [2015-02-21] Dostupné z http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/lcp_bref_0706.pdf
- [11] PUSTĚJOVSKÝ, Pavel: Návrh rotační pece pro spalovnu průmyslových odpadů. Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TU, 1995
- [12] Mitsubishi Waste Incineration Facility Effectively Utilizes Thermal Energy in Industrial Waste h[online]. Dostupné z <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e494/e494001.pdf>
- [13] Numerical Modeling of Granular Flows in Rotary Kilns [online]. 2012 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z http://ta.twi.tudelft.nl/NW/users/domenico/rotary_kiln/romero_litstudyreport_may2012.pdf
- [14] Numerical modeling of granulate bed in rotary kiln [online]. 2012 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z http://ta.twi.tudelft.nl/nw/users/domenico/rotary_kiln/romero_master_thesis.pdf
- [15] Jak to chodí ve spalovně odpadů? [online]. Dostupné z <http://www.kic-odpady.cz/jak-to-chodi.html>
- [16] Waste to energy [online] Dostupné z http://www.bic.be/Waste_to_energy_incinerators.php
- [17] Environmental and waste management [online]. Dostupné z <http://www.ekokem.fi/en/services/environmental-and-waste-management/all-inclusive-services>
- [18] Heat recovery and energy efficiency, improves profitability and reduces CO footprint [online]. Dostupné z <http://ins-news.com/en/100/868/2054/Heat-recovery-and-energy-efficiency-improves-profitability-and-reduces-CO-footprint-Metals--.htm>
- [19] AV ENGINEERING, a.s. [online]. Dostupné z <http://www.aveng.cz/galerie/awards-2005/konstrukce-vyroby.aspx>
- [20] ZVVZ-Enven Engineering, a.s. [online]. Dostupné z <http://www.zvvz.cz/zvvz-enven/produkty/elektricke-odlucovace.html>
- [21] WTER: Flue gas clearing.. [online]. Dostupné z: www.wtert.eu/default.asp?Menu=12&ShowDok=23

[22] ZVVZ-Enven Engineering, a.s. [online]. Dostupné z <http://www.zvvz.cz/zvvz-enven/produkty/latkove-filtry.html>

[23] MBT (tkaninový rukávcový) [online]. Dostupné z <http://www.prumyslovafiltrace.cz/produkty/mbt-tkaninovy-rukavcovy>

[24] STEULER-KCH specialises in refractory linings in hazardous waste incinerators [online]. Dostupné z <http://www.steuler.de/en/steuler-kch/refractory-systems/refractory-linings/thermal-waste-treatment/>

[25] The treatment of hazardous waste without harm to the environment [online]. Dostupné z [http://www.vinci-environnement.com/france/VCE/Minisites.nsf/0/8DDF18D0D883DAD0C125794A005B3BD1/\\$File/ROTARY%20KILN.pdf](http://www.vinci-environnement.com/france/VCE/Minisites.nsf/0/8DDF18D0D883DAD0C125794A005B3BD1/$File/ROTARY%20KILN.pdf)

[26] Waste to Energy – Ecologically compatible disposal of hospital wastes, [online]. Dostupné z http://www.eisenmann.com/en/media/press/pressreleases/2010/2010_09_13_ifat2010_hospitalwaste.html

[27] Inovační prvky v oblasti termického zpracování odpadů [online]. 2004 [cit.2015-04-13]. Dostupné z <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2729-9.pdf>

[28] ČERNÝ Václav a kol.: Parní kotle a spalovací zařízení, Nakladatelství technické literatury, Praha 1, 1975

[29] TOMAN, Zdeněk, BÁLEK Stanislav, KLEČKOVÁ Zuzana: Tepelně technické výpočty [Toman, 1983, záznam a]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1983, 266 s.

[30] JUREČKA, Pavel: Proudění a sdílení tepla: cvičení do předmětu "Sdílení tepla a proudění" [záznam a]. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006, 93 s., [28] s. příl. ISBN 80-248-1083-2

[31] Burners - TG4 Series [online]. Dostupné z http://www.dunphy.co.uk/docs/ds/tg4_datasheet.pdf

[32] Burners TG37Z Series [online]. Dostupné z http://www.dunphy.co.uk/docs/ds/tg3_datasheet.pdf

[33] PRODUX®-Plus is the state-of-the-art process control system of KHD Humboldt Wedag for operation of plants in the cement, coal and minerals industry. [online]. Dostupné z <http://www.khd.com/produx-plus.html>

[34] 'T' Series Axial Air Flow Burners [online]. Dostupné z http://www.dunphy.co.uk/product_range/axial_air.html

[35] Types of Rotary Kilns for Medical Waste Combustion [online] Dostupné z <http://www.bicgroup.com.sg/?q=content/types-rotary-kilns-medical-waste-combustion-0>

[36] RÉDR, Miroslav, PŘÍHODA, Miroslav: Základy tepelné techniky Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1991, 677 s. ISBN 80-03-00366

[37] KOLAT, Pavel: Přenos tepla a hmoty. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1986, 266 s.

[38] IBLER, Zbyněk a kol.: Energetika v příkladech, Nakladatelství BEN-technická literatura, Praha, 2003, ISBN 80-7300-097-0

[39] IBLER, Zbyněk a kol.: Technický průvodce, Nakladatelství BEN-technická literatura, Praha, 2002, ISBN 80-7300-026-1

[40] Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators 2005 [online]. Dostupné z <http://www.tpp.ir/FA/Dep3/Books/01.Industrial%20Boiler.pdf>

[41] An Introduction to Considerations in Rotary Kiln Design [online]. Dostupné z http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CC4QFjAB&url=http%3A%2F%2Fcdn-ci73.actonsoftware.com%2Faction%2Fcdna%2F12345%2Ff-0080%2F0%2F0&ei=aUpQVdnxLsT8Ur_ggbAM&usq=AFQjCNETXo_QAzMDk8p5IZVvndz91CkxuA&bvm=bv.92885102,d.d24

[42] Maguin.com [online]. Dostupné z <http://www.maguin.com/Rotary-kiln>

[43] Waste to Energy 3 - 4: Fluidized Bed Incineration Technology with energy recovery or combined heat-energy recovery [online]. Dostupné z <http://www.epem.gr/waste-c-control/database/html/WtE-02.htm>

[44] Waste & Water solution [online]. Dostupné z http://www.thermaxindia.com/Fileuploader/Files/IncineratorBrochure_new.pdf

[45] Rotary kiln / Rotary drying oven [online] Dostupné z <http://energytek.tw/en/a14.html>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	Určení součinitele přestupu tepla rotační pece
Příloha B	Určení součinitele přestupu tepla dohořivací komory
Výkres	č. ESZ – 2015 – 01 – Spalovací jednotka

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Pavlovi Kolatovi, DrSc. za cenné rady, poskytnuté studijní materiály, připomínky a námitky, které vedly k vypracování této diplomové práce.

Zároveň bych chtěl poděkovat svým nejbližším za jejich podporu v rámci celého kombinovaného studia.

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help			
$t_{\text{medium}} = 1100$ [°C]	Objem = 28,27 [m ³]	$\text{konc}_{\text{CO}_2, \text{v}} = 10,3$ [%]	$\beta = 1$ [1]
$t_{\text{stena}} = 950$ [°C]	Povrch = 62,83 [m ²]	$\text{konc}_{\text{H}_2\text{O}, \text{v}} = 9,8$ [%]	$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,115$ [1]
$p = 1$ [bar]			$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,13$ [1]
$w = 0,006307$ [1]	$\text{vnitrni}_{\text{prumer}} = 2$ [m]		
$m = 7,31$ [kg/s]			
<hr/>			
$\alpha_{\text{sal, sp, spaliny}} = 91,88$ [W/(K*m ²)]	$\alpha_{\text{vnitrni, trubka}} = 41,35$ [W/(K*m ²)]	$\alpha_{\text{vnitrni, trubka, celk}} = 133,2$ [W/(K*m ²)]	
<hr/>			

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help			
$t_{\text{medium}} = 1200$ [°C]	Objem = 72,04 [m ³]	konc _{CO₂,V} = 10 [%]	$\beta = 0,8$ [1]
$t_{\text{stena}} = 1050$ [°C]	Povrch = 99,38 [m ²]	konc _{H₂O,V} = 9,7 [%]	$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,115$ [1]
$p = 1$ [bar]			$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,13$ [1]
$w = 0,006307$ [1]	$v_{\text{nitri}}_{\text{prumer}} = 3,7$ [m]		
$m = 8,576$ [kg/s]			
<hr/>			
$\alpha_{\text{sal,sp,spaliny}} = 114,5$ [W/(K*m ²)]	$\alpha_{\text{vnitri,trubka}} = 27,58$ [W/(K*m ²)]	$\alpha_{\text{vnitri,trubka,celk}} = 142,1$ [W/(K*m ²)]	
<hr/>			